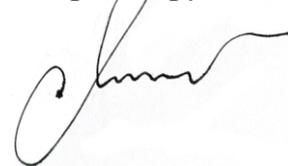


На правах рукописи



ЛИМАРЕНКО НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ
БЕСПОДСТИЛОЧНОГО НАВОЗА**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского
хозяйства
(по техническим наукам)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор

Борычев Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: **Киров Юрий Александрович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Самарский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Сельскохозяйственные машины и механизация животноводства»

Ряднов Алексей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», профессор кафедры «Эксплуатация и технический сервис машин в АПК»

Суржко Олег Арсеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Защита диссертации состоится «19» апреля 2022 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.057.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: www.rgatu.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент



Юхин И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Органические отходы животноводства представляют собой мощный энергоноситель, использовать биогенный потенциал, которого возможно при условии обеспечения условий и требований экологической безопасности, предъявляемых комплексом нормативных документов. Согласно указа президента РФ № 20 от 21.01.2020 «Об утверждении доктрины продовольственной безопасности РФ», удельный объем мясомолочной продукции отечественного производства должен составлять к 2030 году не менее 90%, что требует эффективной индустриализации отрасли. Индустриализация животноводства подразумевает содержание поголовья на высокопроизводительных производствах, с использованием бесподстилочного подхода, что приводит к образованию существенных объемов жидких отходов и бесподстилочного навоза в частности, требующих эффективного обеззараживания. Также важность и актуальность данного направления подтверждается ФЗ «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 № 89-ФЗ (в редакции от 03.12.2017 г.). В связи со сказанным интерес с точки зрения обеззараживания вызывает собой свиной бесподстилочный навоз, требующий разработки эффективных способов и инструментов подавления его патогенной составляющей при сохранении энергетического потенциала.

Известно, что содержание биогенных веществ в свином бесподстилочном навозе ежемесячно снижается на 3...5 % в зависимости от агроклиматических условий, что делает недостаточно эффективным использование длительных биотермических процессов его обеззараживания. Соответственно, разработка технических средств и решений экологически безопасной и энергетически эффективной интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза является актуальной проблемой науки и техники.

Научная гипотеза. Эффективность технологического процесса обеззараживания бесподстилочного навоза может быть повышена цифровизацией с использованием активаторов, что обеспечит максимизацию энерго-экологического эффекта при снижении продолжительности реализации операционных воздействий, а также удельных энергетических затрат.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами повышения эффективности обеззараживания органических отходов в разное время занимались А.М. Бондаренко, А.Ю. Брюханов, Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, С.М. Васильев, Х.Х. Губейдуллин, В.В. Гордеев, П.И. Гриднев, Т.Т. Гриднева, В.С. Григорьев, В.П. Друзьянова, В.П. Капустин, Ю.А. Киров, П.И. Павлов, В.П. Коваленко, В.В. Калюга, В.В. Кирсанов, Г.И. Личман, Я.П. Лобачевский, В.А. Макаров, Н.М. Марченко, А.Е. Новиков, А.И. Ряднов, Н.С. Серпокрылов, О.А. Суржко, И.А. Успенский, А.В. Федотов, Л.Н. Фесенко, В.Д. Хмыров, Ю.А. Цой, М.Н. Чаткин, И.И. Шигапов, И.А. Юхин и др. Они внесли

существенный вклад в изучение вопроса механизации и экологизации сбора и подготовки органических отходов животноводства к эффективному обеззараживанию. Однако, несмотря на разнообразие технологических схем и способов в этой области энергетически эффективные и экологически безопасные модели интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза в виде цифровизированных решений в настоящее время отсутствуют.

Работа выполнена в соответствии с планами НИОКР ФГБОУ ВО РГАТУ на 2015 – 2020 гг. № АААА-А16-116060910025-5 «Совершенствование технологий, средств механизации, электрификации и технического сервиса в сельскохозяйственном производстве», подраздел 3.8 «Совершенствование технологии и технических средств утилизации сточных вод и жидких фракций отходов агропромышленного комплекса», а также договора в рамках реализации грантов Фонда содействия развитию малых форм предпринимательства № 3822ГС1/63200 от 19.12.2020 на выполнение НИОКР по теме: «Разработка прототипа энергоэффективной и экологически безопасной системы утилизации бесподстилочного навоза» (Проект №63200, заявка С1-80529 в рамках реализации инновационного проекта «Энергоэффективная и экологически безопасная система утилизации бесподстилочного навоза»).

Цель исследования – повышение эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать вероятностно-желательностную модель классификации способов обеззараживания бесподстилочного навоза с точки зрения критерия энерго-экологической эффективности.

2. Разработать общие и частные методики, позволяющие экспериментально исследовать энерго-экологическую эффективность обеззараживания бесподстилочного навоза вихревым слоем.

3. Провести экспериментальные исследования энерго-экологической эффективности интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза стержневым и шаровым вихревыми слоями.

4. Обосновать параметры энерго-экологической интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза в стержневом и вихревых слоях.

5. Разработать цифровизированную систему оценки и прогнозирования энерго-экологической эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза.

6. Оценить эколого-экономическую эффективность разработанных решений.

Объект исследования. Технологический процесс обеззараживания бесподстилочного навоза.

Предмет исследования. Закономерности влияния средств интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза на показатели его энерго-экологической эффективности при соблюдении санитарно-эпидемиологических требований.

Научная новизна работы заключается:

– сформирована концептуальная модель повышения энерго-экологической эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза влажностью 88...96%, а также навозных стоков влажностью 98% и выше с использованием активаторов обеззараживания с стержневым и шаровым вихревыми слоями;

– экспериментально доказана эффективность использования электромагнитного активатора обеззараживания бесподстилочного навоза влажностью 88...96 %, а также навозных стоков влажностью 98% и выше, применение которого позволяет в существенной мере интенсифицировать операционное воздействие при сокращении энергозатрат;

– получены математические модели влияния параметров стержневого и шарового вихревых слоёв на санитарно-эпидемиологические параметры бесподстилочного навоза влажностью 88...96 %, а также навозных стоков влажностью 98% и выше при его обеззараживании в активаторах, определяющие экологическую безопасность и энергетическую эффективность операционного воздействия;

– обоснованы оптимальные параметры стержневого и шарового вихревых слоёв активаторов для обеззараживания бесподстилочного навоза влажностью 88...96 %, а также навозных стоков влажностью 98% и выше;

– разработана цифровизированная смарт система повышения эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза.

Научная новизна предлагаемых в работе технических средств и решений подтверждена патентами РФ на изобретения №2726309, №2680073, №2668906, полезную модель №171681, а также свидетельствами о государственной регистрации программных продуктов №2019616853, №2021661091, №2021663928, №2021664999, №2021664791, №2021664736, №2021664838.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке концептуальной структурно-информационной модели обеззараживания бесподстилочного навоза, выявлении факторов, оказывающих влияние на эффективность энерго-экологической интенсификации его обеззараживания, обосновании диапазонов и уровней варьирования факторов, оказывающих влияние на интенсификацию обеззараживания стержневым и шаровым вихревыми слоями в активаторе.

Практическая значимость работы заключается в использовании результатов экспериментальных исследований, предложенных математических моделей при разработке программного продукта в виде цифровизированной

смарт системы повышения эффективности исследования и обеззараживания бесподстилочного навоза, внедрённой в производственную деятельность ОАО «Рязанский свинокомплекс», ОАО «Атемарская Птицефабрика». Полученные результаты, предлагаются к использованию в малых, средних и крупных животноводческих предприятиях при экологическом проектировании уровня антропогенной нагрузки, создаваемой производимыми ими отходами, а также в учебных процессах ВУЗов и СУЗов сельскохозяйственной направленности. Практическая значимость работы подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ №2019616853, №2021661091, № 2021663928.

Реализация результатов исследований. Полученные в ходе данного исследования результаты внедрены и используются в производственной деятельности ОАО «Рязанский свинокомплекс» Рязанская область Рязанский район п. Искра, ОАО «Птицефабрика Атемарская» Республика Мордовия Лямбирский район с. Атемар, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева», ФГБОУ ДПО Мордовский институт переподготовки кадров агробизнеса.

Методология и методы исследований. Исследования проводились на основе применения методов математического моделирования, теории планирования эксперимента, математической статистики, корреляционного и регрессионного анализа, нечёткого моделирования, имитационного моделирования, а также аналого-цифрового преобразования данных. Имитационное моделирование производилось в программных комплексах COMSOL Multyphysics, Solid Works, а также Компас-3D. Обработка результатов экспериментальных исследований производилась с использованием специально разработанных программных продуктов: цифровизированная смарт система эффективной энерго-экологической утилизации органических отходов животноводства (Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021663928 РФ), система выбора оптимального энерго-экологического направления утилизации отходов животноводства (Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021661091 РФ), определение оптимальных параметров операции обеззараживания отходов агропромышленного комплекса «Optimum agriculture system v. 1.0» (Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2019616853 РФ), а также Microsoft Excel, Statistica, Matlab и MathCAD. Экспериментальные исследования проведены в соответствии с разработанными частными методиками в лабораторных и производственных условиях.

Положения, выдвигаемые на защиту:

– концепция повышения энерго-экологической эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза влажностью 88...96%, а также

навозных стоков влажностью 98%, основанная на использовании стержневого и шарового вихревых слоёв в активаторе обеззараживания;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований повышения энерго-экологической эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза;

– математические модели влияния параметров стержневого и шарового вихревых слоёв на санитарно-эпидемиологические свойства бесподстилочного навоза влажностью 88...96 %, а также навозных стоков влажностью 98% и выше при их обеззараживании в активаторе, определяющие экологическую безопасность и энергетическую эффективность операционного воздействия;

– результаты оптимизации стержневого и шарового вихревого слоя активатора для обеззараживания бесподстилочного навоза влажностью 88...96 %, а также навозных стоков влажностью 98% и выше;

– цифровизированная смарт система повышения эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза.

Степень достоверности результатов исследования. Проведение теоретических и экспериментальных исследований с использованием инструментария эффективных способов моделирования: математического и имитационного, статистической обработки данных, планирования эксперимента, сертифицированных и поверенных средств измерений, цифровизированных методов обработки данных позволило получить обоснованные, достоверные и соответствующие теме диссертации результаты исследования и общие выводы.

Апробация результатов исследования. Основное содержание диссертационной работы излагалось, обсуждалось и было одобрено на научно-практических конференциях *международных*: Инновационные технологии в науке и образовании (п. Дивноморское, г. Зерноград, г. Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО ДГТУ, 2013-2017 гг.), Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения (г. Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО ДГТУ, 2013-2017 гг., 2019-2020 гг.), международном молодежном научном форуме «Ломоносов» (г. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2016 г., 2020 г.), Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений (п. Дивноморское, ФГБОУ ВО ДГТУ, 2017 г.), Вклад университетской аграрной науки в инновационное развитие агропромышленного комплекса (г. Рязань, ФГБОУ ВО РГАТУ, 2019 г.), Научно-практические аспекты инновационного развития транспортных систем и инженерных сооружений (г. Рязань, ФГБОУ ВО РГАТУ, 2020 г.), Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники (г. Рязань, ФГБОУ ВО РГАТУ, 2020 г.), 72-я Международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии в современном АПК России: традиции и инновации» (г. Рязань, ФГБОУ ВО РГАТУ, 2021 г.),

Международная научно-практическая конференция, посвященная 95-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, академика РАТ, д.т.н., профессора Н.Н. Колчина «Инженерно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса» (г. Рязань, ФГБОУ ВО РГАТУ, 2021 г.), **национальных:** Актуальные проблемы науки и техники (г. Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО ДГТУ, 2014-2021 г.), Научно-инновационные технологии как фактор устойчивого развития отечественного агропромышленного комплекса (г. Рязань, ФГБОУ ВО РГАТУ, 2019 г.), **всероссийских:** научно-практическая конференция, посвящённая 80-летию со дня рождения профессора Лопатина Анатолия Михайловича (г. Рязань, ФГБОУ ВО РГАТУ, 2019 г.) и других.

Личный вклад соискателя состоит в обосновании актуальности выбранной темы; формулировке цели и задач исследований, выборе объекта и предмета исследований, разработке программы и методики проведения экспериментальных исследований, проведении экспериментальных исследований, анализе полученных данных и решении оптимизационной задачи, обосновывающей параметры эффективного обеззараживания бесподстилочного навоза, разработке системы программных комплексов, представляющей собой цифровизированную смарт систему принятия энергоэффективных и экологически безопасных решений при исследовании бесподстилочного навоза, а также подготовке научных публикаций по теме диссертации, написанию и оформлению заявок на защиту результатов интеллектуальной деятельности.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 53 печатных работах, в том числе: 5 в изданиях Scopus, Web of Science, 20 в изданиях, рекомендованных ВАК, 11 патентах РФ. Объём публикаций составляет 41,8 усл. п. л., из которых лично автору принадлежит – 38,4 усл. п. л.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка источников, включающего 311 наименований, приложений, представленных на 87 страницах. Работа изложена на 397 страницах, включает 18 таблиц и 132 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, описана степень ее разработанности, поставлены цель и задачи исследований, раскрыта методология исследований, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, основные положения диссертации, выдвигаемые для защиты, отражены степень достоверности и апробация результатов исследования.

В первой главе обоснована необходимость интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза, проведён сравнительный анализ его физических, химических и бактериологических свойств на примере КРС, птицы и свиней. Доказано, что свиной бесподстилочный навоз представляет

наибольшую эпидемиологическую опасность для био- и агроценозов, параллельно с этим являясь эффективным энергоносителем биогенных свойств. На основании данных Росстата и Faostat проведён анализ динамики образования объёмов бесподстилочного навоза в зависимости от регионов, установлено, что лидирующие позиции занимают Центральный и Южный регионы Российской Федерации.

Проведён анализ методик оценки выходных объёмов бесподстилочного навоза, с ориентировочной оценкой концентраций биогенных элементов, установлено, что в настоящее время отсутствуют цифровизированные системы, позволяющие реализовать данные алгоритмы в автоматизированном режиме. Представлена динамика среднегодового выхода свиного бесподстилоного навоза в зависимости от производственной мощности хозяйств.

На основании предварительных исследований предложен поправочный коэффициент, позволяющий повысить точность прогнозирования. Доказано, что наиболее перспективным способом оценки выхода отходов животноводческих предприятий является разработка программного комплекса для автоматического расчёта объёмов каждого типа отходов. Определены факторы, способные оказывать влияние на количественные показатели выхода отходов. На основании априорной информации предложена универсальная модель оценки выхода отходов животноводческих предприятий:

$$Q_{\text{общ}} = \left[\sum_{j=1}^m (Q_{\text{тв}} + Q_{\text{жид}} + Q_{\text{техвод}} + Q_{\text{подст}}) \cdot n_j \right] \cdot k_{\text{вн}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{тв}}$ – суммарный ежесуточный объём твёрдой фракции отходов, кг; $Q_{\text{жид}}$ – суммарный ежесуточный объём жидкой фракции отходов, м³; $Q_{\text{техвод}}$ – суммарный ежесуточный объём расхода технологической воды для удаления отходов, м³; $Q_{\text{подст}}$ – масса подстилки на голову животного (в случае подстилочного содержания), кг; n_j – число голов в каждой половозрастной группе, шт; m – количество половозрастных (технологических) групп, шт; $k_{\text{вн}}$ – коэффициент учёта объёма навоза в зависимости от общей исходной влажности материала, %:

$$k_{\text{вн}} = 65,369 \cdot e^{0,3017 \cdot W_H} \quad (2)$$

где W_H – влажность навоза, %.

Проведён анализ технологий подготовки бесподстилочного навоза к использованию. Установлено, что наиболее эффективной по энергоёмкости и определяющей дальнейший уровень экологической безопасности операцией является обеззараживание.

Проведён анализ способов обеззараживания бесподстилочного навоза в зависимости от природы используемых механизмов и разработана их классификация, представленная на рисунке 1.

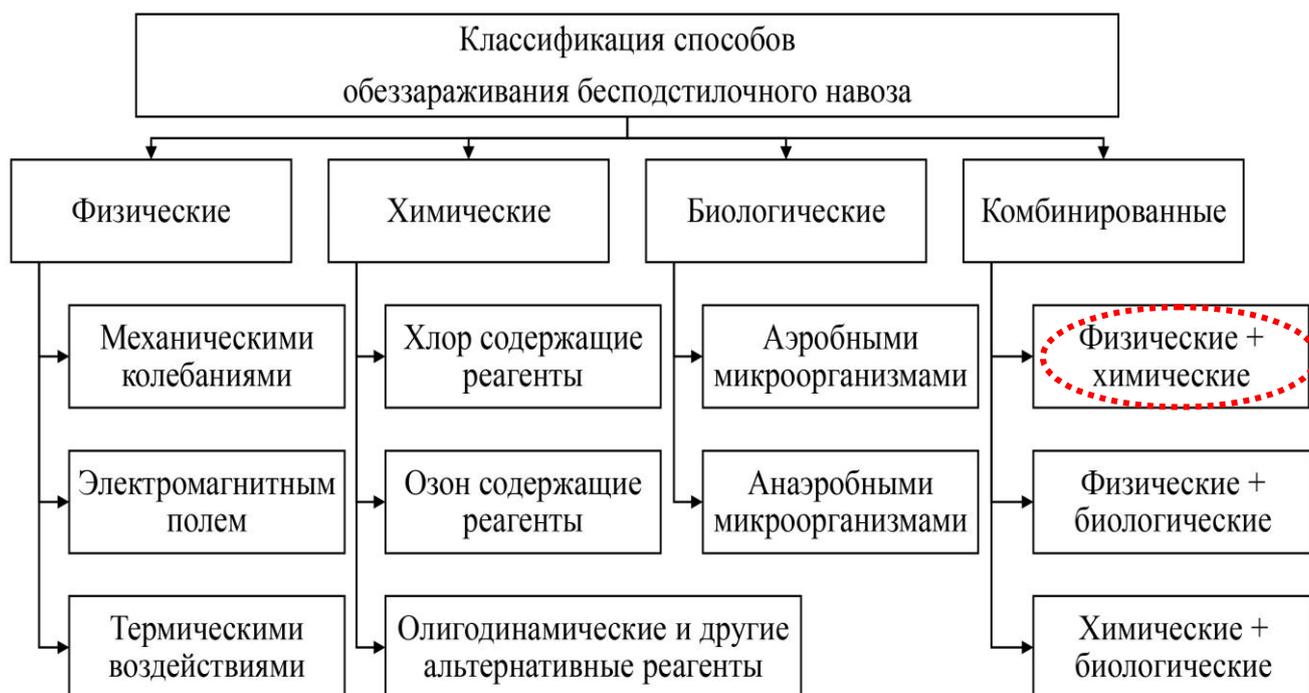


Рисунок 1 – Классификация способов обеззараживания бесподстилочного навоза

Рассмотрены факторы способные оказывать влияние на энергетическую и экологическую эффективность обеззараживания бесподстилочного навоза. Доказано, что обеспечивать максимальный энерго-экологический эффект при интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза возможно путём использования комбинированных воздействий.

На основании проведённого анализа научной проблемы энерго-экологической интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза была сформулирована цель исследования, определены задачи необходимые для её достижения, а также выбраны объект и предмет исследования.

Во второй главе проведены теоретические исследования используемых способов обеззараживания бесподстилочного навоза с точки зрения сформулированных критериев энерго-экологической оценки. Рассмотрены методологические аспекты использования теории потенциальной эффективности как инструмента концептуально-параметрической систематизации используемых способов. С помощью инструментария теории потенциальной эффективности исследован комплекс факторов способных оказывать влияние на энерго-экологическую эффективность обеззараживания бесподстилочного навоза. Так как понятие «эффективность» является комплексным и включает различные группы корректирующих коэффициентов. Но установлением оптимальной эффективности можно считать нахождение определённых соотношений этих коэффициентов, обеспечивающих минимизацию или максимизацию параметров протекания технологического процесса в зависимости от поставленной задачи. С целью систематизации

представления процесса обеззараживания бесподстильного навоза рассмотрена его структурно-имитационная модель функционирования (см. рис.2), имеющая вектор функции входных \vec{x} , управляющих \vec{u} и возмущающих воздействий \vec{z} , а также выходных параметров \vec{y} для каждой из операций. Поскольку в основе вероятностно-статистических методов исследования лежит построение математических моделей, имитирующих функционирование реальных объектов, с учётом анализа рисунка 2, где представлены вектор-функции в виде функционалов.

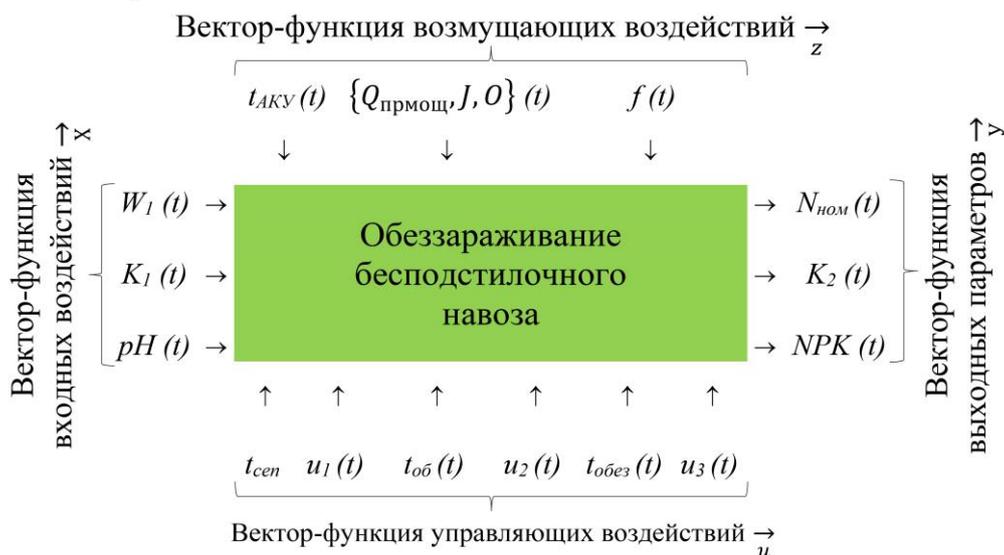


Рисунок 2 – Структурно-имитационная модель обеззараживания бесподстильного навоза

Функционал вектор-функции входных воздействий:

$$\vec{x} = \{W_1(t), K_1(t), pH(t)\}, \quad (3)$$

где $W_1(t)$ – влажность образованных отходов; $K_1(t)$ – группа параметров, характеризующая исходный уровень экологической нагрузки утилизируемого энергоносителя (бактериологическая обсеменённость (число колониеобразующих единиц (КОЕ) общих колиформных бактерий (ОКБ), бляшкообразующих единиц (БОЕ), термотолерантных колиформных бактерий (ТТКБ), фекальных стрептококков (ФКСТК) и др.)); $pH(t)$ – водородный показатель образованных отходов.

Функционал вектор-функции выходных воздействий:

$$\vec{y} = \{N_{ном}(t), K_2(t), NPK(t)\}, \quad (4)$$

где $N_{ном}(t)$ – номинальная удельная мощность обеззараживания; $K_2(t)$ – группа параметров, характеризующая конечный уровень экологической нагрузки обеззараживаемого энергоносителя (бактериологическая обсеменённость (число КОЕ ОКБ, КОЕ БОЕ, КОЕ ТТКБ, КОЕ ФКСТК и др.)); $NPK(t)$ – группа параметров, характеризующая агрохимические свойства обеззараживаемого энергоносителя.

Функционал вектор-функции возмущающих воздействий:

$$\vec{z} = \left\{ t_{AKV}(t) \begin{bmatrix} Q \\ J \\ O \end{bmatrix} (t), f(t) \right\}, \quad (5)$$

где $t_{AKV}(t)$ – группа параметров, характеризующая сезон работ и агроклиматические условия региона; $Q_{прмошц}(t)$ – группа параметров, характеризующая производственную мощность хозяйства; $J(t)$ – группа параметров, характеризующая способ содержания животных; $O(t)$ – группа параметров, характеризующая способ удаления бесподстилочного навоза; $f(t)$ – группа параметров, характеризующая направление дальнейшего использования бесподстилочного навоза.

Функционал вектор-функции управляющих воздействий включает в себя совокупность факторов, позволяющих оперативно изменять параметры рассмотренного операционного воздействия в целом:

$$\vec{u} = \{t_{cen}(t), t_{обез}(t), u_3(t)\}, \quad (6)$$

где $t_{cen}(t)$ – продолжительность сепарации бесподстилочного навоза; $t_{обез}(t)$ – продолжительность обеззараживания жидкой фракции; $u_3(t)$ – группа конструктивно-технологических параметров, определяющих режим работы активатора обеззараживания жидкой фракции.

Посредством управляющего воздействия параметры операционного воздействия на выходе должны соответствовать агротехническим, санитарно-эпидемиологическим и экологическим требованиям. Функционал вектор-функции управляющих воздействий позволяет выделить три приемлемых уровня экологической нагрузки обеззараживания, создаваемой энергоносителем при предъявляемых к нему санитарно-эпидемиологических и энергетических ограничениях (см. рисунок 3).

	Предельно допустимый уровень экологической нагрузки	Приемлемый уровень экологической нагрузки	Минимальный уровень экологической нагрузки
Показатели экологической нагрузки	$K_2 = f(\text{КОЕ ОКБ, КОЕ БОЕ, КОЕ ТТКБ, КОЕ ФКСТК}) \rightarrow \max;$ $NPK = \text{const}$	$K_2 = f(\text{КОЕ ОКБ, КОЕ БОЕ, КОЕ ТТКБ, КОЕ ФКСТК}) = K_{2\text{ном}};$ $NPK = \text{const}$	$K_2 = f(\text{КОЕ ОКБ, КОЕ БОЕ, КОЕ ТТКБ, КОЕ ФКСТК}) \rightarrow \min;$ $NPK \rightarrow \max$
Показатель энергетической эффективности	$N_{НОМ} \rightarrow \min$	$N_{НОМ} = N_{ОПТ}$	$N_{НОМ} \rightarrow \max$

Рисунок 3 – Шкала условий эколого-энергетической эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза

В качестве сравнения были выбраны 9 наиболее широко применяемых способов обеззараживания бесподстилочного навоза (см. рисунок 4). Рассмотрены их укрупнённые группы: способы 1, 2, 3, 5, 6 не требующие предварительного фракционного разделения и использующие естественное биотермическое обеззараживание; способы 4, 7, 8, использующие фракционное разделение, но не использующие активаторы обеззараживания, способ 9 подразумевающий фракционное разделение и использование активатора обеззараживания.

Для оценки интенсивности биотрансформационных способностей способов обеззараживания бесподстилочного навоза, на основании предварительных исследований разработана модель:

$$i_{bis} = \frac{\sum_i^n \frac{((N_i + Q_i + S_i) \cdot t_i)}{q_i}}{n_{KOE}^{PAT} - \sum_i^n \left[\left(1 - \frac{n_{KOE}^{PAT} - x}{n_{KOE}^{PAT}}\right) \cdot n_{KOE}^{PAT} - x \right]}, \quad (7)$$

где N_i – удельные затраты активной мощности на реализацию i -го операционного воздействия, кВт·ч; Q_i – удельные затраты реактивной мощности на реализацию i -го операционного воздействия, кВАр·ч; S_i – удельные затраты полной мощности на реализацию i -го операционного воздействия, кВА·ч; t_i – момент времени, затрачиваемый на реализацию i -го операционного воздействия, ч; q_i – производительность i -го операционного воздействия, кг/ч; n_{KOE}^{PAT} – число колониеобразующих единиц патогенных бактерий до реализации i -го операционного воздействия, шт.; n_{KOE}^{PAT-x} – число колониеобразующих единиц патогенных бактерий после реализации i -го операционного воздействия, шт.

Поскольку сравнение способов обеззараживания бесподстилочного навоза является многофакторной и разно-параметрической задачей, установлено, что рациональным инструментом её решения в совокупности с теорией потенциальной эффективности является использование методов нечётких множеств, частным случаем которых является функция желательности Харрингтона. К преимуществам данного инструментария следует отнести соответствие функции желательности требованиям интеграции в общий экспертный исполнительный аппарат по следующим параметрам: количественности, возможности выражения группы параметров обобщённым критерием, однозначности, универсальности и полноты – как общей, неспецифичной характеристики объекта. Градуировка желательности представляет собой психофизическую шкалу, функцией которой является установление соответствий между натуральными значениями частных показателей, в качестве которых выступают параметры предложенных технологий, и психофизических параметров, представляющих экспертные

апостериорные оценки желательности значения показателей. Граничными условиями шкалы являются два значения $d = 0$ и $d = 1$. При этом 1 соответствует максимально желательному значению функции, а 0 максимально нежелательному. Преимуществом данной градуировки является унифицированность вычислений, при которой $d = 0,63 \approx 1 - (1 / e)$. Для сравнения способов обеззараживания органических отходов используем следующие параметры желательности: удельные энергетические затраты; относительный уровень экологической безопасности, выраженный пролонгированным бактерицидным эффектом и уровнем эпидемиологической безопасности. Кодирование частных значений функции желательности d_i в обобщенную функцию желательности D , производилось методом свёртки.

В качестве параметров, определяющих энерго-экологическую желательность, были выбраны: удельные энергетические затраты, относительный уровень экологической безопасности, выражаемый соотношением числа колониеобразующих единиц патогенных форм до операционных воздействий и после, наличие пролонгированного бактерицидного эффекта. На основании результатов предварительных исследований, анализа информационных источников, а также экспертной оценки в таблице 1 представлены весовые коэффициенты желательности способов обеззараживания с помощью функции Харрингтона.

Таблица 1 – Экспертные оценки желательности способов обеззараживания бесподстилочного навоза

№	Желательность d				
	Низкая	Ниже среднего	Средняя	Выше среднего	Высокая
1	0-0,20	0,21-0,37	0,38-0,63	0,64-0,80	0,81-1,0
2	Удельные затраты энергии y_1 , кВт·ч/м ³				
3	10	8	6	4	2
4	Относительный уровень экологической безопасности y_2 , %				
5	25	45	70	85	100
6	Наличие пролонгированного бактерицидного эффекта y_3 , час.				
7	0	12	48	72	168

В ходе реализации алгоритма оценки с помощью функции желательности в результате преобразований были получены и решены методом Крамера квадратичные уравнения для которых были получены следующие коэффициенты для y_1' :

$$\left. \begin{array}{l} b_0 = 2,840 \\ b_1 = -0,316 \\ b_2 = -0,005 \end{array} \right| y_1' = 2,840 - 0,316x - 0,005x^2; \quad (8)$$

коэффициенты для y'_2 :

$$\left. \begin{array}{l} b_0 = 0,033 \\ b_1 = -0,021 \\ b_2 = -0,00045 \end{array} \right| y'_2 = 0,033 - 0,021x - 0,00045x^2; \quad (9)$$

коэффициенты для y'_3 :

$$\left. \begin{array}{l} b_0 = -0,163 \\ b_1 = -0,316 \\ b_2 = -0,00015 \end{array} \right| y'_3 = -0,163 - 0,316x - 0,00015x^2. \quad (10)$$

Получив квадратичные функции (8), (9), (10) характеризующие уровень желательности сравниваемых параметров определим их частные, кодированные значения и обобщённые значения D для каждого из них, их расчётные значения приведены в таблице 2. На рисунке 4 представлена графическая интерпретация функции желательности Харрингтона при сравнении способов обеззараживания бесподстилочного навоза на основании определённых весовых коэффициентов. На основании проведённых расчётов результаты, которых представлены в таблицах 1 и 2, анализа графической зависимости на рисунке 4, установлено, что интегральный показатель эффективности способов обеззараживания согласно шкале желательности Харрингтона, лежит в диапазоне 0,5...0,7 для способов.

Таблица 2 – Параметры функции желательности сравниваемых параметров

№	Параметры			Значения				
1	2			3				
1	Удельные энергетические затраты y_1	Значения частного параметра	2	4	5,5	8,4	9,5	10
		Кодированные значения частного параметра	-	-	-	-	-	-
		Частные функции желательности	0,1378	0,1115	0,0909	0,0493	0,0329	0,0253
		Обобщенная функция желательности D_1	0,3401					
2	Относительный уровень экологической безопасности y_2	Значения частного параметра	25	45	70	85	95	100
		Кодированные значения частного параметра	0,2374	0,6933	1,4326	1,9666	2,3602	2,5684
		Частные функции желательности	0,4544	0,6065	0,7876	0,8694	0,9099	0,9262
		Обобщенная функция	0,7361					

продолжение таблицы 2

№	Параметры		Значения					
1	2		3					
		желательности D_2						
3	Наличие пролонгированного бактерицидного эффекта уз	Значения частного параметра	0	12	48	72	124	168
		Кодированные значения частного параметра	0,1629	0,0057	0,7721	1,4999	3,6722	6,1466
		Частные функции желательности	0,3082	0,3700	0,6300	0,8000	0,9749	0,9979
		Обобщенная функция желательности D_3	0,6183					

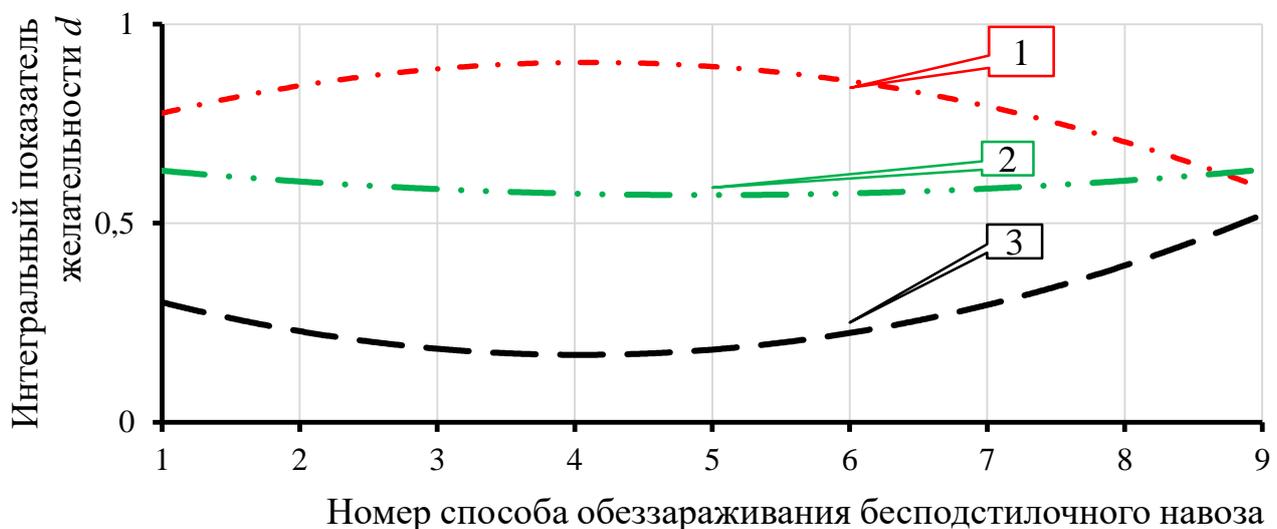


Рисунок 4 – Эффективность способов обеззараживания бесподстилочного навоза в соответствии с показателем желательности:

1 – Уровень энергетических затрат; 2 – Уровень экологической нагрузки; 3 – Наличие пролонгированного бактерицидного эффекта

С точки зрения анализа удельных энергетических затрат, относительного уровня экологической безопасности и наличия пролонгированного бактерицидного эффекта перспективным является использование способа 9 с интенсивным обеззараживанием в электромагнитном активаторе. Коэффициент желательности при этом составляет диапазон 0,55...0,63, что соответствует среднему уровню и является наиболее приоритетным, поскольку подразумевает развитие системы.

В третьей главе разработаны общие и частные методики экспериментальных исследований влияния стержневого и шарового вихревых слоёв, реализуемого индуктором активатора при обеззараживании бесподстилочного навоза. На основании анализа информационных источников, а также результатов предварительных исследований обоснованы диапазоны варьирования исследуемых факторов, области интереса предъявляемых условий, а также измеряемые в ходе экспериментального исследования

параметры. Активатор состоит из неподвижной и подвижной частей. Неподвижная представляет собой электромагнитный индуктор, создающий вращающийся переменный магнитный поток. Подвижная – систему из ферромагнитных элементов, роль которых могут выполнять как стержни, так и тела сферической формы. Выбор типа подвижной части электромагнитного активатора обуславливается физико-реологическими свойствами обрабатываемого в нём технологического материала. На рисунке 5 представлена имитационная 3D модель активатора, разработанная в среде Solid Works.

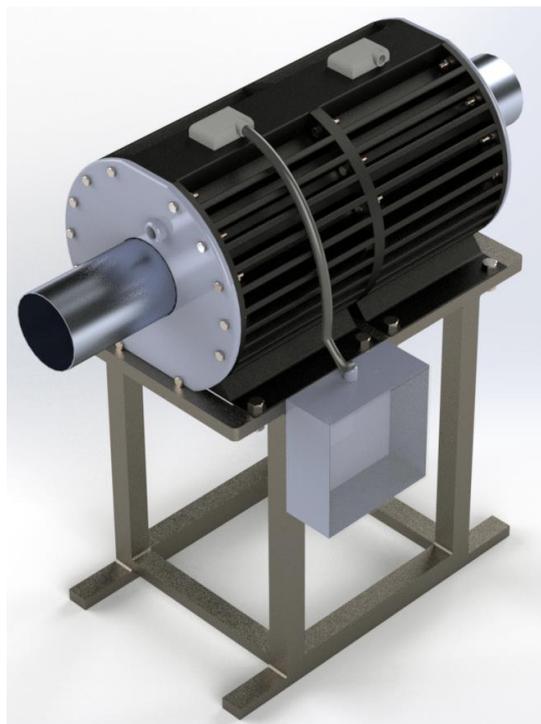
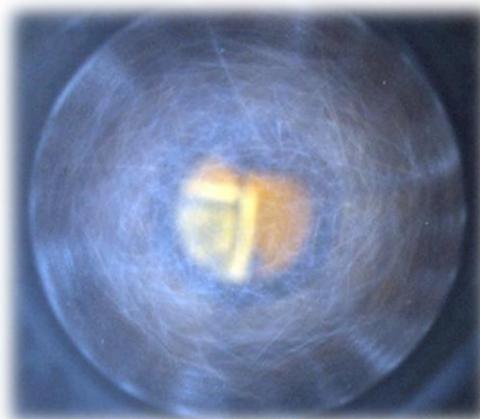


Рисунок 5 – Имитационная 3D модель активатора

На рисунке 6 представлены результаты скоростной киносъёмки вихревого слоя образованного подвижной частью (пат. № 2668906) в зависимости от исполнения: 1 – стержневой слой, 2 – шаровой слой.



Исполнение 1



Исполнение 2

Рисунок 6 – Картина распределения подвижных органов в зависимости от исполнения в рабочей зоне электромагнитного активатора

На основании проведённого анализа обоснованы составляющие характеризующие энергетическую эффективность и удельные энергетические затраты необходимые для реализации операционного воздействия электромагнитным активатором. В общем виде это сведено к оценке удельной энергоёмкости электромагнитного индуктора, которая заключается в измерении амплитудных значений силы тока, напряжения и угла сдвига фаз в единицу времени на единицу объёма, что можно представить аналитически в виде формулы:

$$N_{yэ} = \frac{\left(U_m I_m \sin^2 \left(\omega t + \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p dt}{\sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T p dt \right)^2 + \left(\int_0^T q dt \right)^2}} \right) \right)}{\frac{\pi \cdot D_{pз}^2 \cdot l_{pз}}{4}}, \quad (11)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения питающей сети, В; I_m – амплитудное значение силы тока питающей сети, А; ω – угловая частота колебаний электрического тока питающей сети, Гц; T – время одного полного цикла колебания, сек; p – мгновенная активная мощность, передаваемая полюсам индуктора, Вт; q – мгновенная реактивная мощность, циркулирующая в контуре, ВАр; φ – угол сдвига фаз амплитудных значений напряжения и силы тока питающей сети, °; t – продолжительность операционного воздействия, сек; $D_{pз}$ – диаметр рабочей зоны, реализующей системное физико-химическое воздействие, мм; $l_{pз}$ – длина рабочей зоны цилиндра, реализующего системное физико-химическое воздействие, мм.

Так как для разработки научных основ цифровизированной системы энерго-экологической оценки эффективности обеззараживания в активаторе необходимо получить достоверные математические модели, то рациональным инструментом достижения поставленной задачи является использование математической теории планирования эксперимента, применение которой подразумевает нормальный закон распределения параметров. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения осуществлялась на основании анализа априорной информации и эмпирических данных о плотности вероятности значений числа КОЕ ОКБ, КОЕ БОЕ, КОЕ ТТКБ, КОЕ ФКСТК. Функция плотности распределения которых представляется зависимостью:

$$f(p) = \frac{1}{S_p \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p_i - \mu_p)^2}{2S_p^2}}, \quad (12)$$

где S_p – среднеквадратичное отклонение случайной величины p ; μ_p – оценка математического ожидания случайной величины p .

Интегральная функция плотности распределения которых представляется зависимостью:

$$F(p) = \int_{-\infty}^{\chi} f(p)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\chi} e^{-\frac{(\chi-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (13)$$

Область принятия гипотезы определялась исходя из неравенства

$$\chi_p^2 \leq \chi_{кр}^2, \quad (14)$$

где χ_p^2 – расчётное значение критерия Пирсона; $\chi_{кр}^2$ – критическое значение критерия Пирсона.

Графическая интерпретация описанных зависимостей представлена на рисунке 7 для параметров, характеризующих санитарно-эпидемиологическую составляющую эффекта обеззараживания. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения для рассматриваемых параметров была принята, поскольку во всех случаях расчётные значения критерия Пирсона оказались меньше критических при этом уровень значимости распределений составлял $\alpha = 0,05$, а вероятность ошибки была не более 5 %. Принятие данной гипотезы позволило обосновать использование математической теории планирования эксперимента применительно к поставленной задаче. В таблице 3 представлены факторы и уровни их варьирования.

Таблица 3 – Факторы и уровни их варьирования

№	Факторы	Обозн.	Нижн. – 1	Нулев. 0	Верхн. + 1	Δx_i	Δx_i нат.
1	Концентрация активного хлора ω в мг/л	x_1	10	13	16	3	5
2	Масса стержней / шаров $m_{cm}/m_{ш}$, гр	x_2	600	1000	1400	400	708
3	Магнитная индукция B в мТл	x_3	40	60	80	20	35
4	Влажность бесподстилочного навоза W , %	x_4	88	93	98	5	9
5	Продолжительность воздействия t в с	x_5	6	9	12	3	5

В качестве используемого плана экспериментального исследования применялись 3-х факторный не композиционный план второго порядка Бокса-Бенкена, а также D -оптимальный 5-ти факторный план Хартли Na_5 со «звёздными» точками.

Анализ эмпирических и теоретических зависимостей на рисунке 7, а также проверка полученных данных в соответствии с методикой РТМ 44-62 подтвердил вывод о соответствии нормальному закону распределения параметров числа КОЕ.

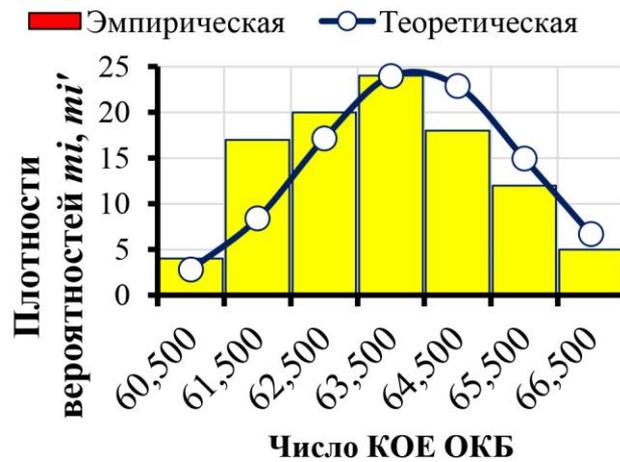
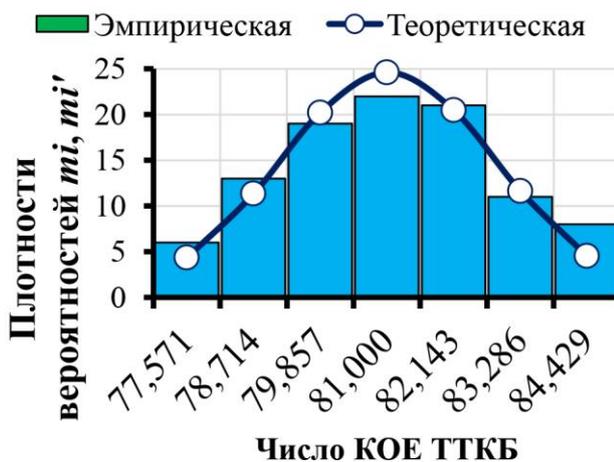
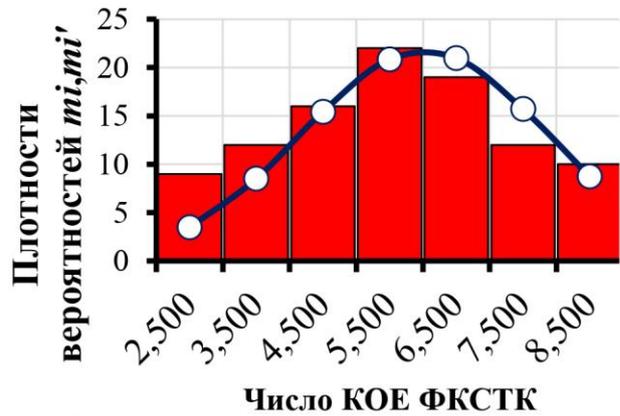
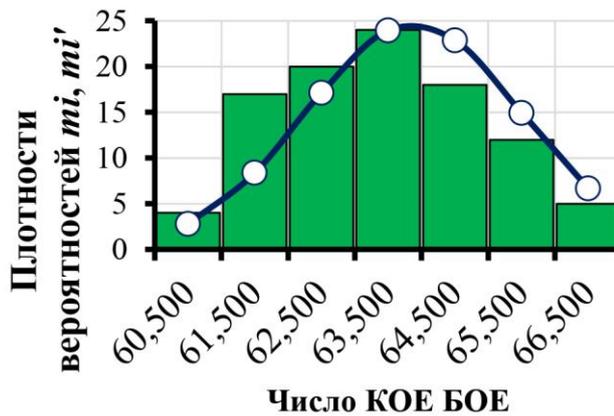


Рисунок 7– Эмпирическая и теоретическая зависимости распределения частоты числа КОЕ БОЕ, ОКБ, ТТКБ, ФКСТК после обеззараживания в активаторе

В четвёртой главе проведены экспериментальные исследования по обоснованию оптимальных с энерго-экологической точки зрения параметров обеззараживания бесподстилочного навоза в активаторе. С целью минимизации энергозатрат при проведении экспериментальных исследований в среде программного пакета Comsol Multiphysics было произведено имитационное моделирование энергетических характеристик в зависимости от используемой геометрии рабочих тел формирующих вихревой слой, а также уровня заполненности ими технологической зоны. Расчёт уровня заполненности рабочими телами в случае их стержневого исполнения производился по формуле (15), в случае шарового по формуле (16):

$$\rho_{zn} = \frac{V_{pm} \cdot 100}{V_{pz}} = \frac{(\pi \cdot l_{cm} \cdot R_{cm}^2) \cdot 100}{\pi \cdot h_{pz} \cdot R_{pz}^2}, \quad (15)$$

$$\rho_{zn} = \frac{V_{pm} \cdot 100}{V_{pz}} = \frac{\left(\frac{4}{3} \pi \cdot R_{шара}^3\right) \cdot 100}{\pi \cdot h_{pz} \cdot R_{pz}^2}, \quad (16)$$

где V_{pm} – объём рабочих тел, мм³; V_{pz} – объём рабочей зоны, мм³; l_{cm} – длина стержня, мм; R_{cm} – радиус стержня, мм; h_{pz} – длина рабочей зоны, мм; R_{pz} – радиус рабочей зоны, мм; $R_{шара}$ – радиус шара, мм.

Используемые в ходе имитационного моделирования рабочие тела обладали следующими параметрами: стержня $R_{cm} = 2$ мм, $l_{cm} = 30$ мм, шара $R_{шара} = 3$ мм. В качестве материала была принята сталь 2013. В качестве ограничений были приняты диаметр рабочей зоны $D_{pz} = 140$ мм, число пар полюсов индуктора $p = 1$, напряжение питающей сети $U = 380$ В, циклическая частота колебаний электрического тока $f = 50$ Гц. На рисунках 9 и 10 представлены результаты имитационного моделирования энергетических характеристик индуктора активатора при минимальном уровне заполненности шаровым вихревым слоем и максимальном уровне стержневого вихревого слоя.

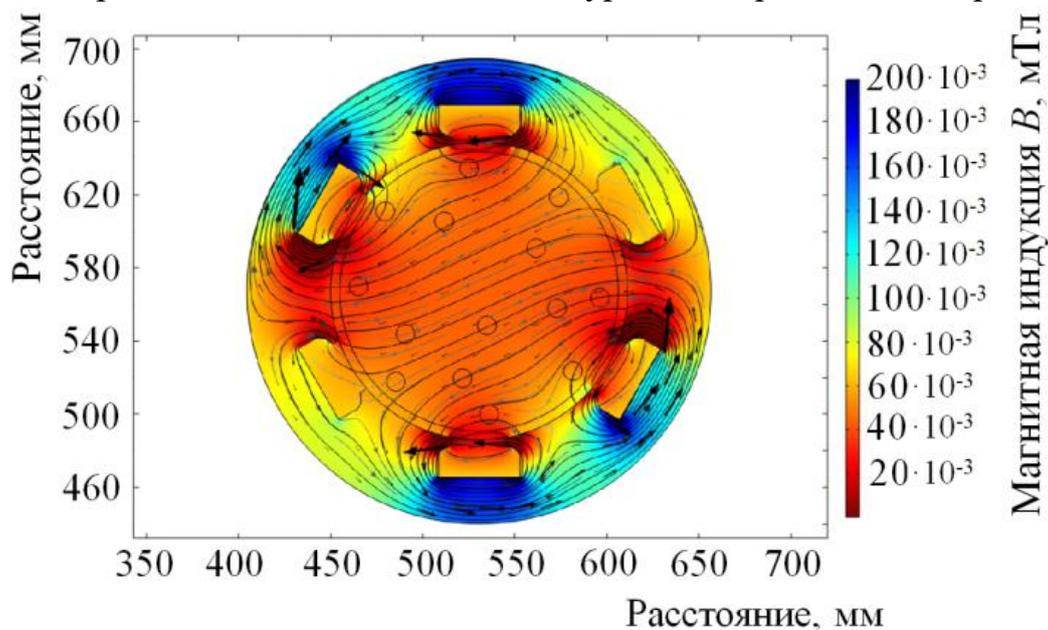


Рисунок 9 – Распределение магнитного потока в технологической зоне индуктора при минимальном уровне заполненности шаровым вихревым слоем

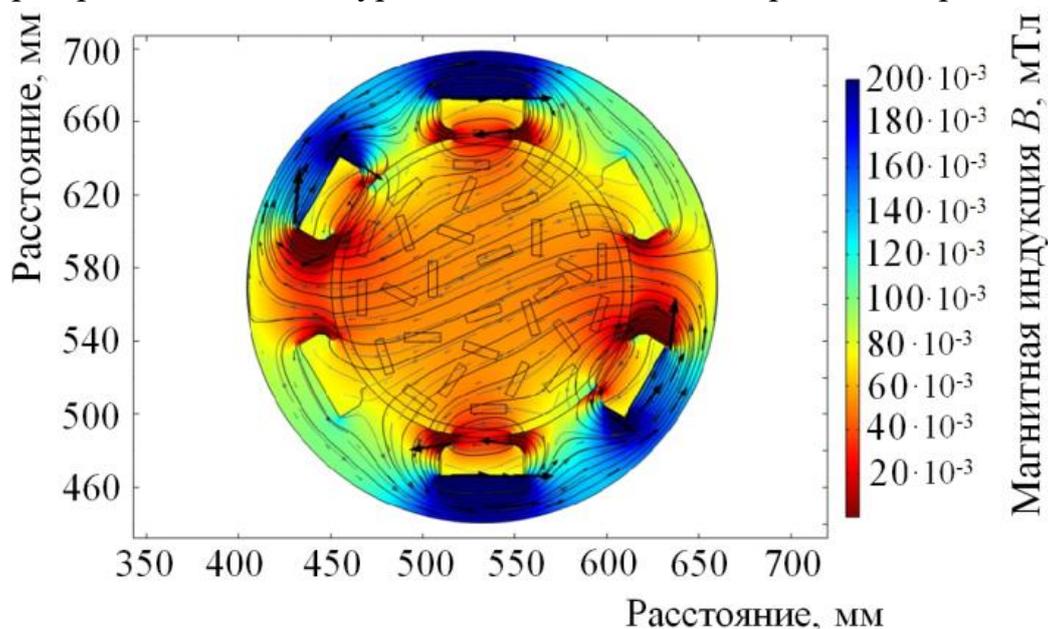


Рисунок 10 – Распределение магнитного потока в технологической зоне индуктора при максимальном уровне заполненности стержневым вихревым слоем

Анализ результатов имитационного моделирования позволил установить, что распределение магнитного потока, оцениваемое с помощью вектора магнитной индукции в центральной точке технологической зоны (530 мм по горизонтали и 570 мм по вертикали) отличается в зависимости от формы рабочих тел. Выбранные координаты сравнения центральной точки технологической зоны объясняются наибольшим сопротивлением данного участка. При минимальном уровне заполненности технологической зоны шаровыми рабочими телами уровень магнитной индукции составляет $B \approx 50$ мТл, при максимальном $B \approx 68...72$ мТл, без рабочих тел не более $B \approx 15...20$ мТл, тогда как при минимальном уровне заполненности технологической зоны стержневыми рабочими телами уровень магнитной индукции составляет $B \approx 38...40$ мТл, при максимальном $B \approx 54...57$ мТл. Объяснить данные расхождения можно различной массой рабочих тел. Соответственно, можно сделать вывод, что с энергетической точки зрения наиболее предпочтительным является использование шаровых рабочих тел.

В ходе реализации разработанных в предыдущей главе методик были проведены экспериментальные исследования влияния интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза стержневым и шаровым вихревыми слоями в активаторе. Результаты экспериментального исследования влияния стержневого вихревого слоя на интенсификацию обеззараживания бесподстилочного навоза в активаторе формализованы с помощью математических моделей, представленных ниже при исключении функций при статистически незначимых коэффициентах:

– число КОЕ БОЕ в натуральных переменных:

$$\begin{aligned}
 Y_{КОЕБОЕ}^{cm} = & -2114,33 + 71,54\omega + 0,51m_{cm} + 12,60B + 16,23W + \\
 & + 91,59t - 0,02B^2 - 0,72t^2 - 0,06\omega m_{cm} - 0,13\omega B - \\
 & - 0,49\omega W - 0,82\omega t - 0,001m_{cm}B - 0,0037m_{cm}W - 0,0062m_{cm}t - \\
 & - 0,073BW - 0,12Bt - 0,53Wt
 \end{aligned} \tag{17}$$

– число КОЕ ОКБ в натуральных переменных:

$$\begin{aligned}
 Y_{КОЕОКБ}^{cm} = & -2210,18 + 72,55\omega + 0,58m_{cm} + 13,63B + 16,60W + \\
 & + 95,00t - 0,02B^2 - 0,70t^2 - 0,007\omega m_{cm} - 0,14\omega B - \\
 & - 0,49\omega W - 0,82\omega t - 0,001m_{cm}B - 0,0037m_{cm}W - 0,0062m_{cm}t - \\
 & - 0,073BW - 0,12Bt - 0,57Wt
 \end{aligned} \tag{18}$$

– число КОЕ ТТКБ в натуральных переменных:

$$\begin{aligned}
 Y_{КОЕТТКБ}^{cm} = & -2239,67 + 73,47\omega + 0,58m_{cm} + 13,70B + 16,90W + \\
 & + 97,56t - 0,019B^2 - 0,68t^2 - 0,007\omega m_{cm} - 0,15\omega B - \\
 & - 0,49\omega W - 0,82\omega t - 0,001m_{cm}B - 0,0037m_{cm}W - 0,0062m_{cm}t - \\
 & - 0,073BW - 0,12Bt - 0,60Wt
 \end{aligned} \tag{19}$$

– удельная энергоёмкость активатора со стержневым вихревым слоем в натуральных переменных:

$$Y_{уд.э}^{cm} = 24,34 + 0,005m_{cm} - 0,1705B + 0,066\omega^2 + 1,08B^2 + 1,00t^2 \quad (20)$$

Результаты экспериментального исследования влияния шарового вихревого слоя на интенсификацию обеззараживания бесподстилочного навоза в активаторе формализованы с помощью математических моделей, представленных ниже с учётом исключения функций при статистически незначимых коэффициентах:

– число КОЕ БОЕ в натуральных переменных:

$$Y_{КОЕБОЕ}^{uu} = -2134,81 + 70,42\omega + 0,56m_{uu} + 13,38B + 16,03W + 89,40t - 0,02B^2 - 0,71t^2 - 0,006\omega m_{uu} - 0,13\omega B - 0,49\omega W - 0,82\omega t - 0,001m_{uu}B - 0,0037m_{uu}W - 0,0062m_{uu}t - 0,073BW - 0,12Bt - 0,51Wt \quad (21)$$

– число КОЕ ОКБ в натуральных переменных:

$$Y_{КОЕОКБ}^{uu} = -2150,13 + 71,38\omega + 0,57m_{uu} + 13,22B + 16,23W + 89,67t - 0,018B^2 - 0,617t^2 - 0,006\omega m_{uu} - 0,13\omega B - 0,49\omega W - 0,82\omega t - 0,001m_{uu}B - 0,0037m_{uu}W - 0,0062m_{uu}t - 0,073BW - 0,12Bt - 0,53Wt \quad (22)$$

– число КОЕ ТТКБ в натуральных переменных:

$$Y_{КОЕТТКБ}^{uu} = -2081,20 + 69,65\omega + 0,56m_{uu} + 12,82B + 15,81W + 84,75t - 0,016B^2 - 0,57t^2 - 0,006\omega m_{uu} - 0,12\omega B - 0,49\omega W - 0,82\omega t - 0,0009m_{uu}B - 0,0037m_{uu}W - 0,0062m_{uu}t - 0,073BW - 0,12Bt - 0,48Wt. \quad (23)$$

– удельная энергоёмкость активатора с шаровым вихревым слоем в натуральных переменных:

$$Y_{уд.э}^{uu} = 230,14 + 0,005m_{uu} - 0,1915B + 0,074\omega^2 + 0,0029B^2 + 0,023W^2 + 0,11t^2 \quad (24)$$

Достоверность полученных математических моделей подтверждена использованием стандартизированных подходов оценки адекватности полученных статических характеристик. Графическая интерпретация результатов исследования интенсификации бесподстилочного навоза стержневым и шаровым вихревым слоем на удельную энергоёмкость активатора представлена на рисунках 10...13.

Анализ результатов экспериментальных исследований интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза стержневым и шаровым вихревым слоем позволил представить сравнительные характеристики их эффективности (см. рис. 14...16).

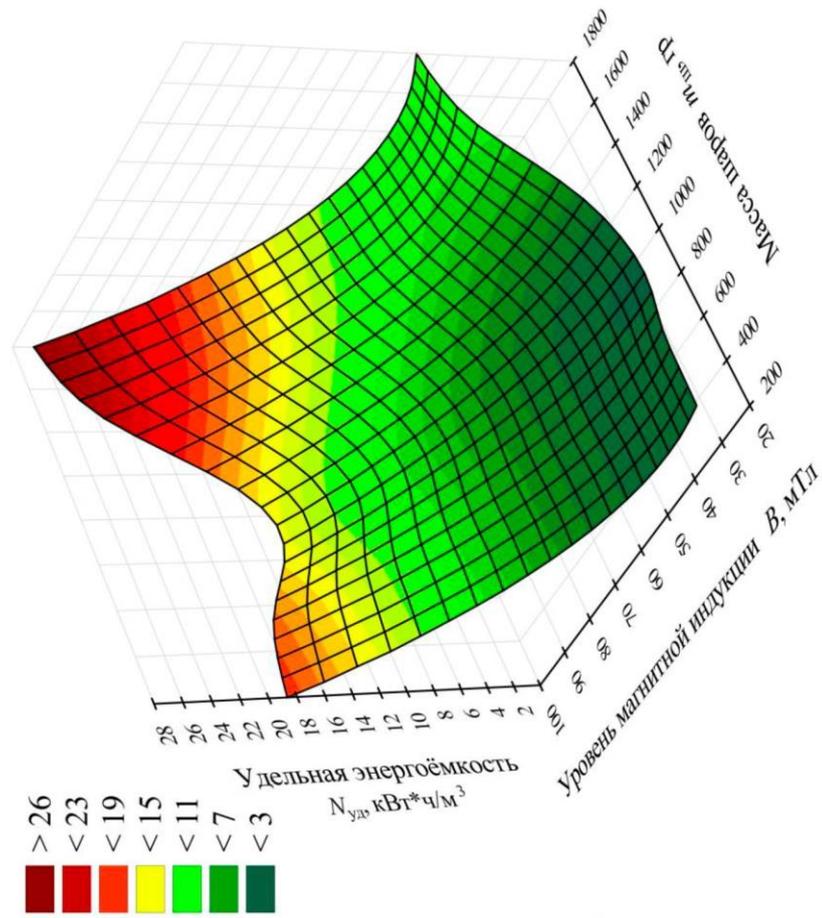


Рисунок 11 – Влияние магнитной индукции и массы шаров на удельную энергоёмкость активатора обеззараживания

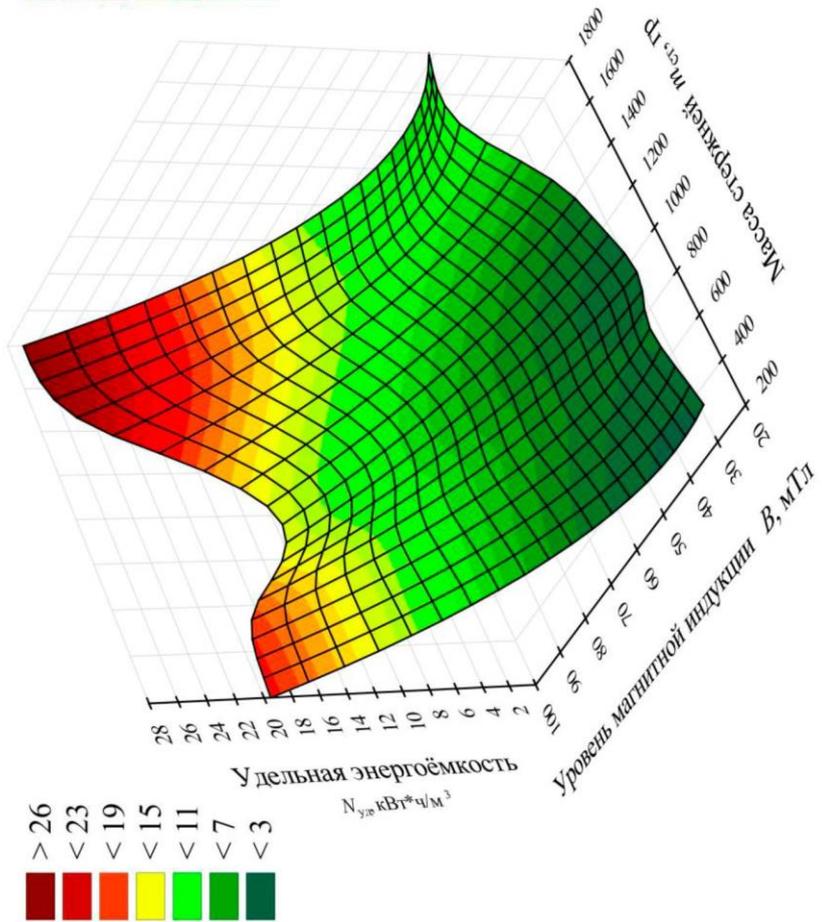


Рисунок 10 – Влияние магнитной индукции и массы стержней на удельную энергоёмкость активатора обеззараживания

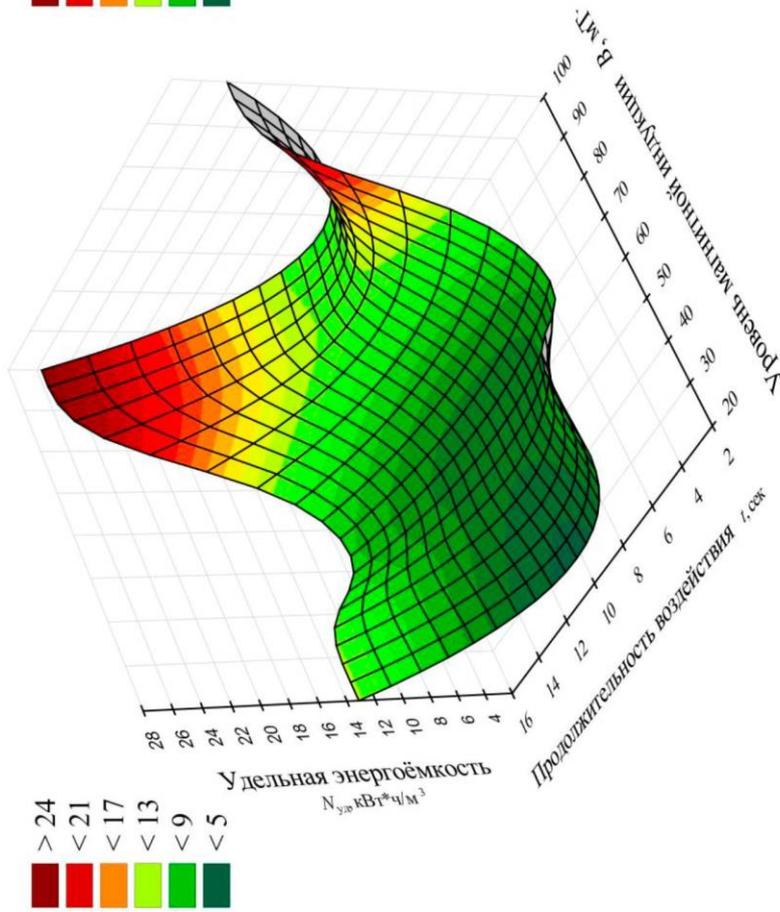


Рисунок 12 – Влияние продолжительности воздействия стержневым вихревым слоем и магнитной индукции на удельную энергоёмкость активатора обеззараживания

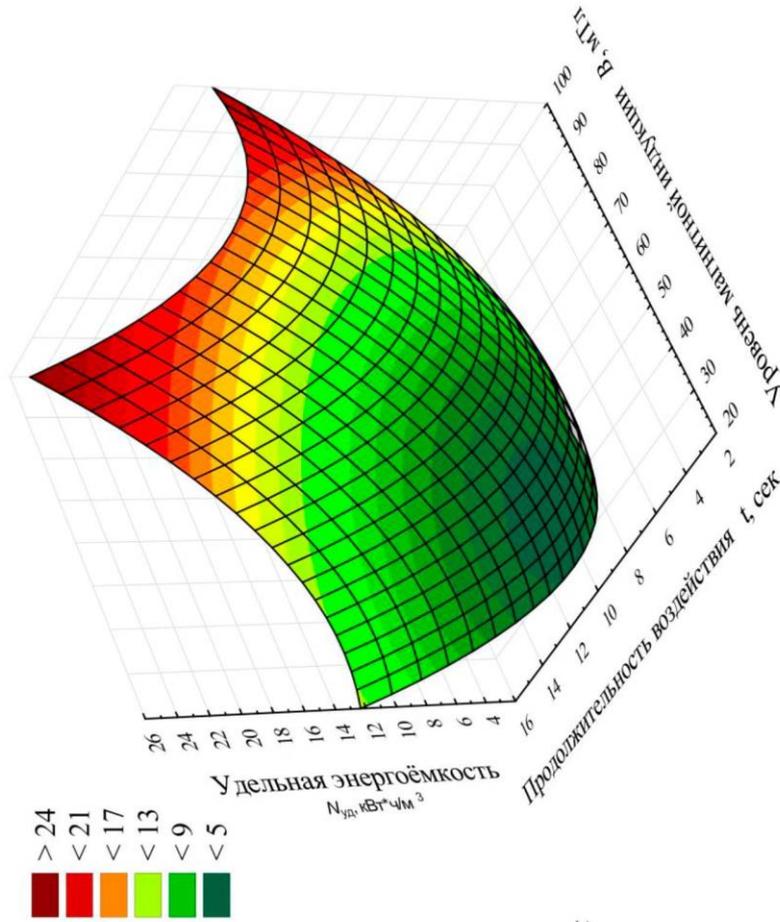


Рисунок 13 – Влияние продолжительности воздействия шаровым вихревым слоем и магнитной индукции на удельную энергоёмкость активатора обеззараживания

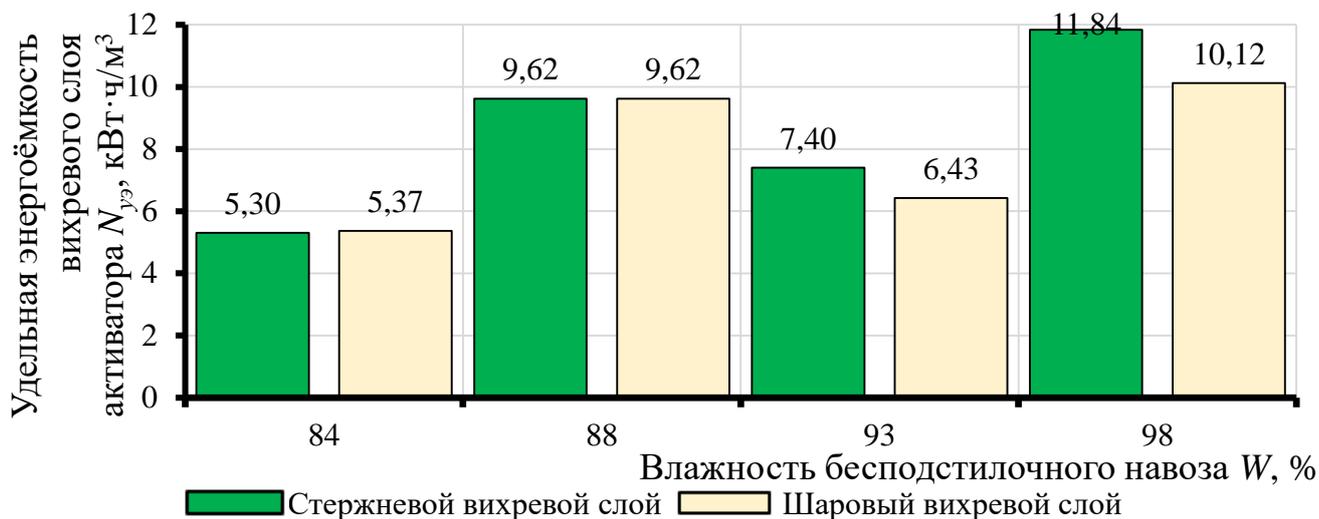


Рисунок 14 – Сравнительная характеристика влияния стержневого и шарового вихревых слоёв на их удельную энергоёмкость

На рисунке 15 представлена сравнительная характеристика влияния влажности бесподстилочного навоза на эффективность обеззараживания с использованием величины обобщённого критерия экологизации, вычисленного с помощью модели (7) в специально разработанном программном комплексе (Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021661091 РФ) с учётом ограничений, предъявляемых нормативными документами.

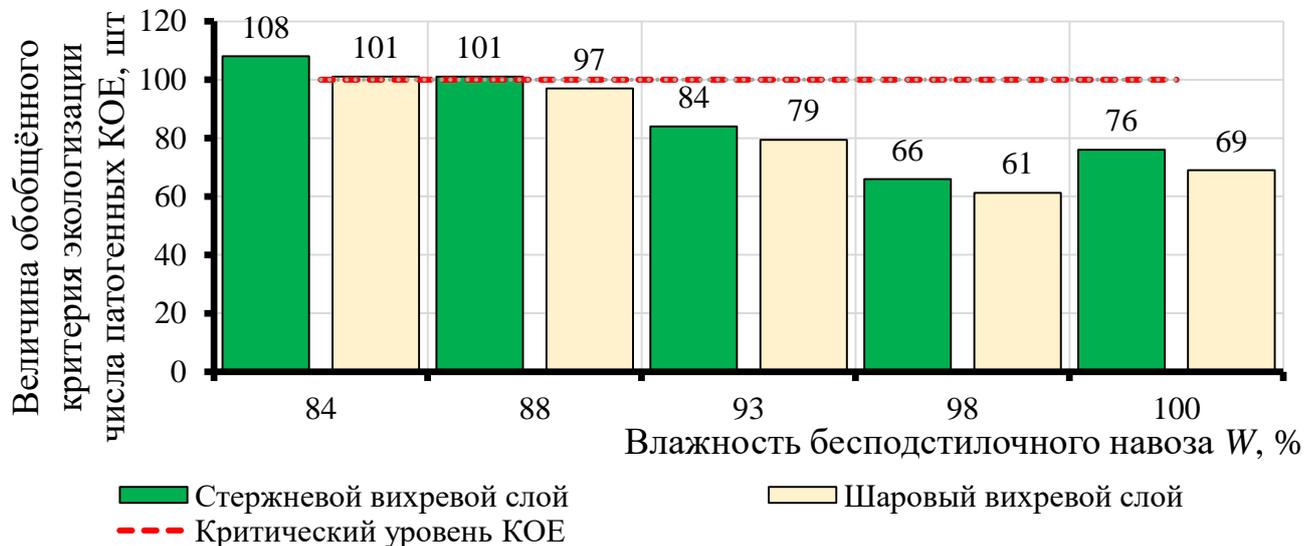


Рисунок 15 – Сравнительная характеристика влияния влажности бесподстилочного навоза на эффективность обеззараживания в зависимости от типа вихревого слоя

На рисунке 16 представлена сравнительная характеристика энерго-экологической эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза стержневым и шаровым вихревыми слоями. Экологический эффект оценивается усреднённым числом КОЕ патогенных микроорганизмов после воздействия, а энергетический – удельной энергоёмкостью активатора.

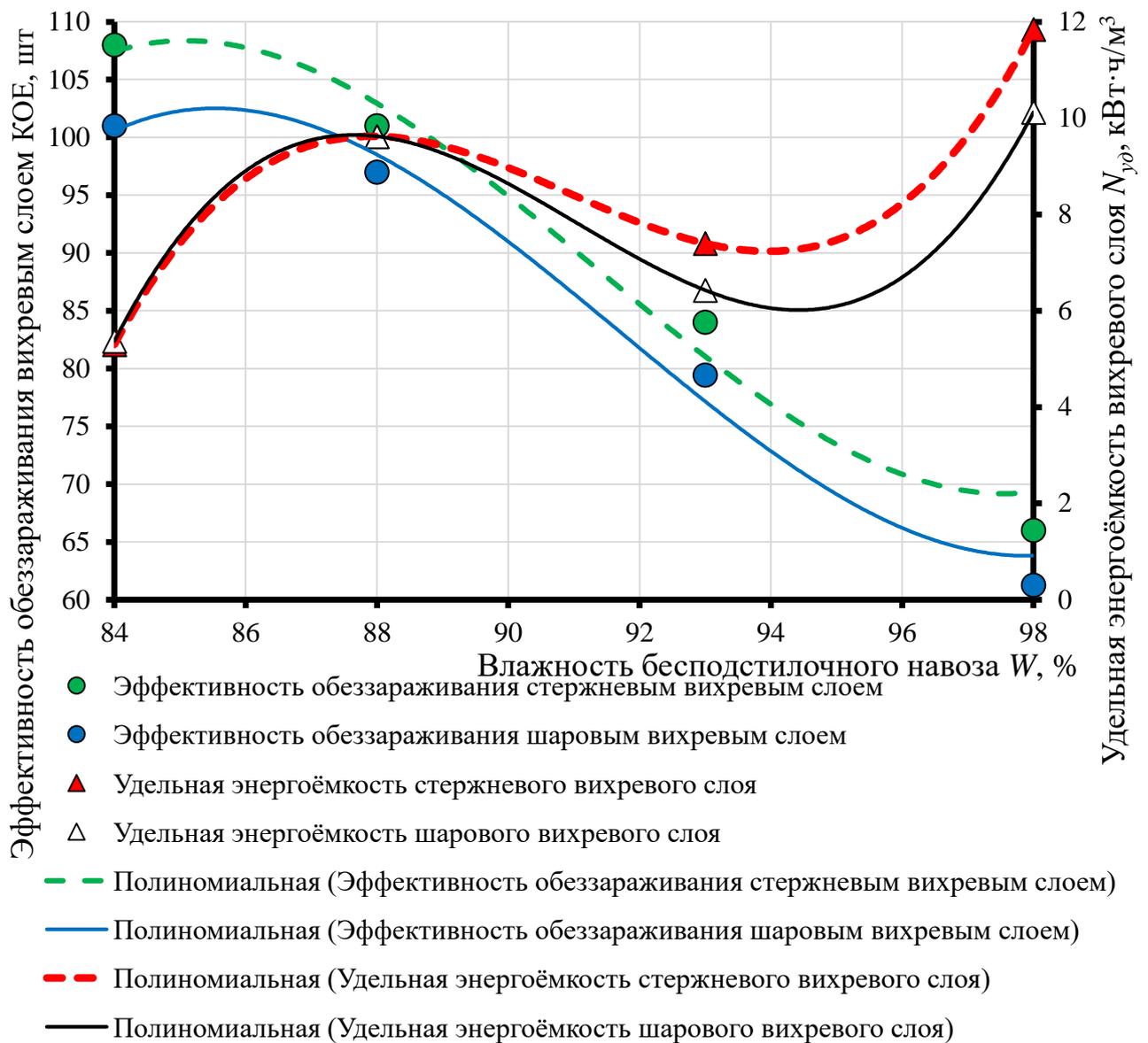


Рисунок 16 – Сравнительная характеристика энерго-экологической эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза вихревыми слоями

Проанализировав результаты, представленные на рисунках 14, 15, 16 можно сделать вывод, что наибольший эффект с экологической и энергетической точки зрения при обеззараживании бесподстилочного навоза обеспечивается шаровым вихревым слоем.

Так как одним из этапов обоснования параметров энерго-экологической интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза в активаторе являлось решение оптимизационной задачи, то можно провести оценку монотонности целевых функций для обеспечения исключения принятия локального экстремума за глобальный.

Оценка монотонности функций (20) и (24) удельной энергоёмкости стержневого и шарового вихревых слоёв получена с помощью частных производных:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2x_1 = 0; \\ 2,19 = 0; \\ 3,07 + 2,16x_3 = 0; \\ 2x_5 = 0. \end{array} \right. \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1,34x_1 = 0; \\ 2,19 = 0; \\ 3,07 + 2,3x_3 = 0; \\ 1,18x_4 = 0; \\ 2,14x_5 = 0. \end{array} \right. \quad (26)$$

Так как полученные системы уравнений (25) и (26) несовместны, и не имеют решений в области допустимых значений переменных, можно сделать вывод, что функции (20) и (24) не имеют критических точек, и как следствие точек экстремума, что позволяет осуществлять поиск наибольшего или наименьшего значения функций (20) и (24) на границе допустимых значений их переменных. Следовательно, рассматриваемые функции монотонны и возможно использовать метод полного перебора.

На рисунке 17 представлена блок-схема оптимизационной задачи при поиске экстремума целевой функции в программном пакете «Optimum agriculture system v. 1.0».

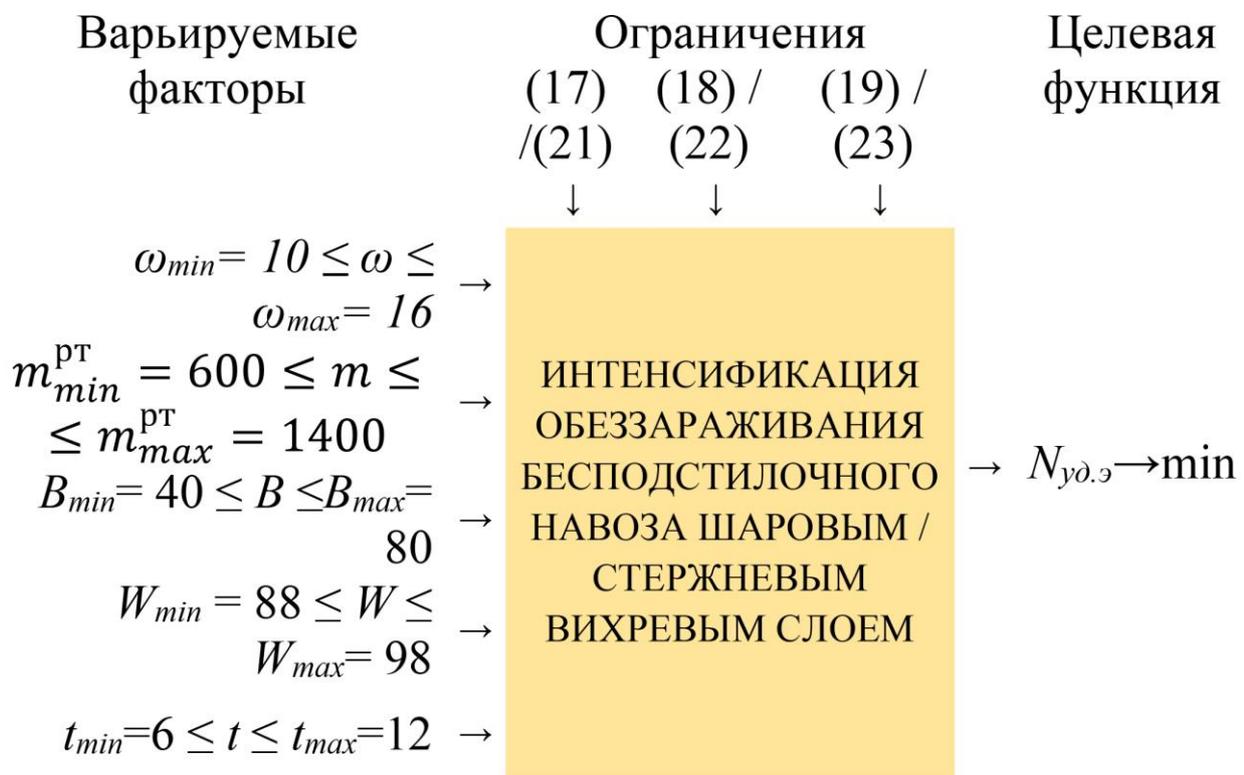


Рисунок 17 – Блок-схема оптимизационной задачи определения параметров интенсификации обеззараживания стержневым и шаровым вихревыми слоями

Решение оптимизационной задачи с технико-экономической точки зрения заключается в нахождении значений параметров активатора обеззараживания, обеспечивающих минимальные энергетические затраты, при соблюдении предельно допустимых значений числа КОЕ БОЕ, ОКБ, ТТКБ в бесподстилочном навозе.

В результате решения оптимизационной задачи установлены сочетания факторов, обеспечивающих минимальные затраты энергии при достижении максимального санитарно-эпидемиологического эффекта для интенсификации стержневым вихревым слоем: концентрация активного хлора $\omega = 7,2$ мг/л; масса стержней $m_{cm} = 600$ гр.; уровень магнитной индукции в технологической зоне активатора $B = 40$ мТл; влажность бесподстилочного навоза $W = 88$ %; продолжительность совместного воздействия $t = 6,2$ с. При этом уровень удельной энергоёмкости составляет $N = 4,942$ кВт·ч/м³.

В результате решения оптимизационной задачи установлены сочетания факторов, обеспечивающих минимальные затраты энергии при достижении максимального санитарно-эпидемиологического эффекта для интенсификации шаровым вихревым слоем: концентрация активного хлора $\omega = 7,0$ мг/л; масса шаров $m_{ш} = 600$ гр.; уровень магнитной индукции в технологической зоне активатора $B = 40$ мТл; влажность бесподстилочного навоза $W = 90$ %; продолжительность совместного воздействия $t = 6,1$ с. При этом уровень удельной энергоёмкости составляет $N = 4,132$ кВт·ч/м³.

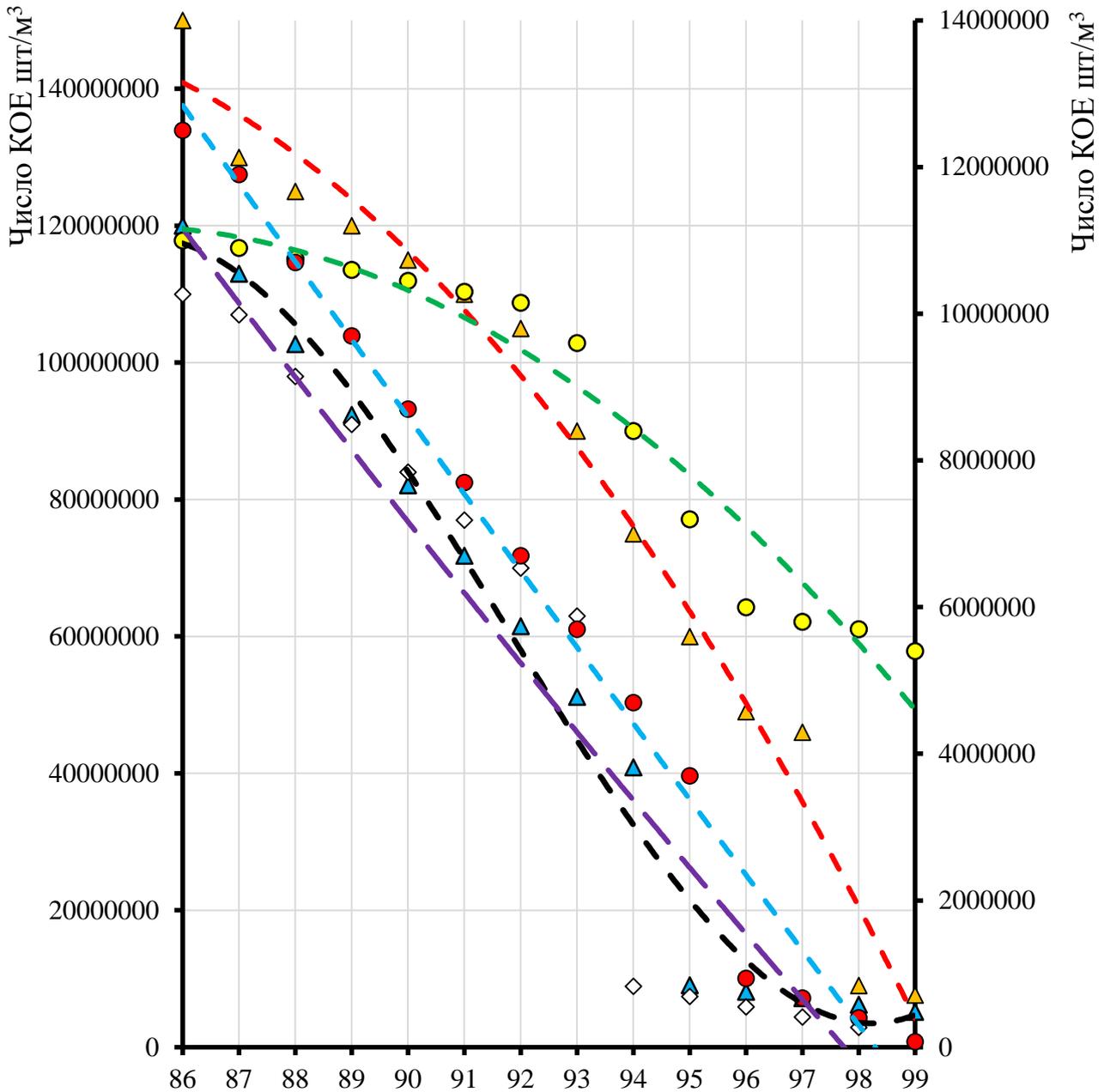
В пятой главе разработана цифровизированная смарт-система исследования повышения эффективности энерго-экологической утилизации бесподстилочного навоза и органических отходов животноводства (Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021663928 РФ), интерфейсные формы которой представлены на рисунке 18. Разработанная цифровизированная смарт-система состоит из шести модулей: моделирования экологической нагрузки (см. рисунок 19), моделирования энергозатрат на обеззараживание в активаторе, моделирование энергетических характеристик индуктора активатора в зависимости от производительности, седиментационного анализа бесподстилочного навоза, расчёта энергетической эффективности технических средств, используемых при утилизации бесподстилочного навоза, в данном случае обеззараживания (см. рисунок 20), а также модуля проверки эффективности выбора приводов рабочих органов технических средств, применяемых в процессе подготовке органических отходов животноводства к обеззараживанию.

Сценарием взаимодействия пользователя и разработанной смарт системы является диалог: пользователь выбирает модуль, вводит соответствующие значения параметров напротив их текстового описания, затем следуя рекомендациям системы осуществляет вывод результатов в требуемой форме с возможностью последующего импорта данных.



Рисунок 18 – Интерфейс разработанной цифровизированной смарт-системы эффективной энерго-экологической утилизации органических отходов животноводства при отображении на устройстве *Android*

Разработанная система может быть использована для оценки и исследования энерго-экологического потенциала технических средств, используемых при подготовке органических отходов животноводства к утилизации. Область применения – экологическое проектирование систем подготовки органических отходов животноводства к утилизации, энергетический аудит используемых технических средств. Функциональные возможности – моделирование энергетических характеристик и комплексная оценка эффективности технических средств, используемых при подготовке органических отходов к утилизации, седиментационный анализ технологических материалов. В данном исследовании разработанная система использовалась применительно к свиному бесподстилочному навозу.



Влажность свиного бесподстилочного навоза W , %

▲ КОЕ бактерий группы кишечных палочек до обеззараживания

▲ КОЕ бактерий группы энтерококков до обеззараживания

◇ КОЕ бактерий группы аэробных спорообразующих микроорганизмов до обеззараживания

● КОЕ бактерий группы стафилококков до обеззараживания

● КОЕ яиц: аскариды, трихоцефала, эзофагостом, фасциол, личинок стронгилят, крысиного цепня, клещей до обеззараживания

Рисунок 19 – Зависимость уровня экологической нагрузки, создаваемой свиным бесподстилочным навозом

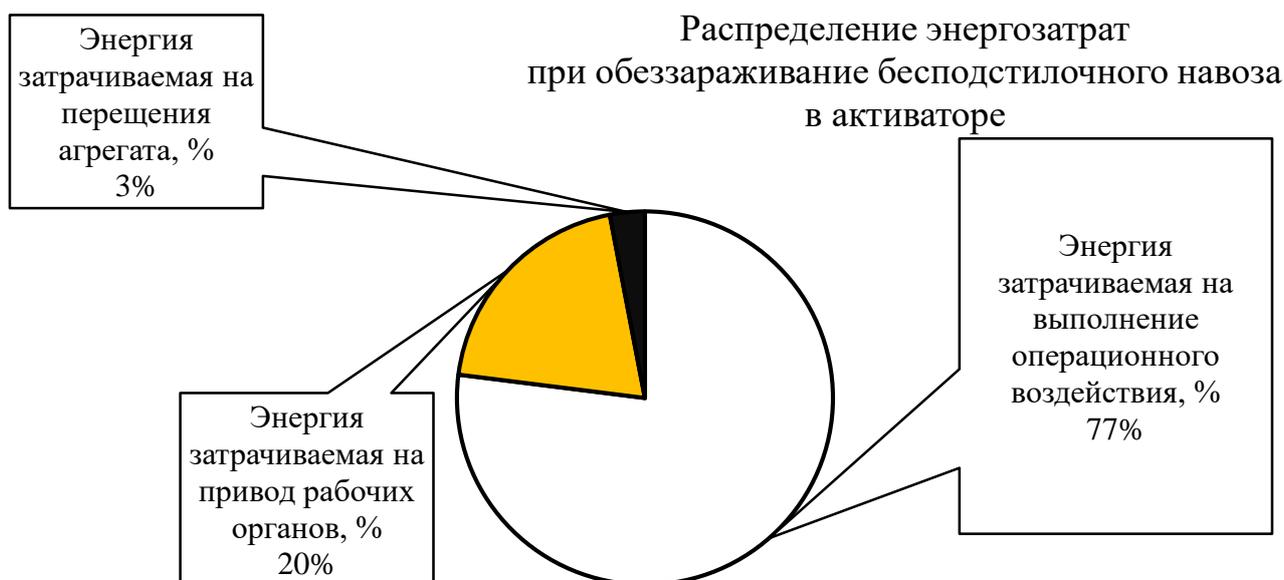


Рисунок 20 – Результаты расчёта распределения энергетических затрат для обеззараживания бесподстилочного навоза влажностью 92% в активаторе

В шестой главе произведена оценка технико-экономической эффективности применения разработанных технических средств повышения эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза относительно применяемых аналогов. Оценка осуществлялась методом приведённых затрат, годовой экономический эффект составил 2 973 086 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана нечёткая модель классификации способов обеззараживания бесподстилочного навоза на основании вероятностно-желательностного подхода с использованием функции Харрингтона. Установлено, что интегральный показатель эффективности обеззараживании бесподстилочного навоза согласно шкале желательности Харрингтона, лежит в диапазоне 0,5...0,7. С точки зрения анализа удельных энергетических затрат, относительного уровня экологической безопасности и наличия пролонгированного бактерицидного эффекта перспективным является использование активатора, осуществляющего интенсивное обеззараживание в электромагнитном индукторе. Новизна и перспективность данного способа подтверждается патентом РФ (№ 2726309 от 13.07.2020).

2. Разработаны общие и частные методики экспериментальных исследований, изготовлены необходимые элементы приборно-метрологического обеспечения, а также рекомендации по их использованию. Обоснованы диапазоны варьирования факторов, условия проведения эксперимента, измеряемые параметры, а также планы экспериментальных

исследований обеззараживания бесподстилочного навоза шаровым и стержневым вихревыми слоями.

3. Экспериментально исследована энерго-экологическая эффективность обеззараживания бесподстилочного навоза шаровым и стержневым вихревыми слоями в активаторе, получены математические модели, формализующие и позволяющие оценить энерго-экологическую эффективность обеззараживающего воздействия. Проведена оценка достоверности и статистической значимости полученных моделей. Разработан программный продукт реализации предлагаемого способа исследования (Optimum agriculture system v. 1.0, свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2019616853 РФ).

4. Обоснованы параметры, обеспечивающие максимальную энерго-экологическую эффективность интенсификации обеззараживания бесподстилочного навоза, для стержневого вихревого слоя – концентрация активного хлора $\omega = 7,2$ мг/л; масса стержней $m_{ст} = 600$ гр.; уровень магнитной индукции в технологической зоне активатора $B = 40$ мТл; влажность бесподстилочного навоза $W = 88$ %; продолжительность совместного воздействия $t = 6,2$ с, уровень удельной энергоёмкости при этом составляет $N = 4,942$ кВт·ч/м³; для шарового вихревого слоя – концентрация активного хлора $\omega = 7,0$ мг/л; масса шаров $m_{ш} = 600$ гр.; уровень магнитной индукции в технологической зоне активатора $B = 40$ мТл; влажность бесподстилочного навоза $W = 90$ %; продолжительность совместного воздействия $t = 6,1$ с; при этом уровень удельной энергоёмкости составляет $N = 4,132$ кВт·ч/м³, данные параметры получены исходя из производительности обработки бесподстилочного навоза 30 м³/час.

5. Разработана цифровизированная смарт система исследования повышения эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза (свид. о гос. рег. пр. для ЭВМ 2021661091 РФ, свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021663928 РФ, свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021664838 РФ, свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021664736 РФ, свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021664791 РФ, свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021664999 РФ). В которой реализован механизм повышения эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза в активаторах. Данная система внедрена в производственную деятельность АО «Рязанский свинокомплекс», ОАО «Птицефабрика Атемарская».

6. Эколого-экономическая оценка эффективности применения разработанных технических средств обеззараживания бесподстилочного навоза с помощью метода приведённых затрат позволила определить годовой экономический эффект 2 973 086 рублей.

Рекомендации производству

Для повышения эффективности реализации операционных воздействий рекомендуется использовать программно-аппаратные комплексы, позволяющие

на основании статистических данных разработать рекомендации об оптимальных параметрах принимаемых решений.

Перспективы дальнейшего развития темы

Дальнейшим развитием полученных результатов является расширение имеющейся базы данных для повышения достоверности и быстродействия применяемых рекомендаций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

– в изданиях перечня Web of Science, Scopus:

1. Byshov, N.V. Parameters of optimized system of technological process of waste water disinfection of livestock enterprises in integrated physico-chemical effects / N.V. Byshov, I.A. Uspensky, I.A. Yukhin, **N.V. Limarenko**, I.V. Fadeev, S.D. Fomin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 341 (012140). DOI: 10.1088/1755-1315/341/1/012140.

2. **Limarenko, N.V.** Prospects of Using of Chemicals in Environmentally safe Disinfection of Liquid Waste from Livestock Enterprises / **N.V. Limarenko**, E.V. Krasnova, L.A. Pudeyan, O.E. Baryshnikova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 582 (012015). DOI:10.1088/1757-899X/582/1/012015.

3. Бышов, Н.В. Концептуальная модель энергетической эффективности получения экологически безопасного утилизационного свиного бесподстилочного навоза / Н.В. Бышов, И.А. Успенский, И.А. Юхин, М.Н. Чаткин, **Н.В. Лимаренко** // Инженерные технологии и системы. – 2020. – № 3. – С. 394-412. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.394-412.

4. Byshov, N.V. Ecological and technological criteria for the efficient utilization of liquid manure / N.V. Byshov, I.A. Uspensky, I.A. Yukhin, **N.V. Limarenko** // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. DOI:10.1088/1755-1315/422/1/012069.

5. **Limarenko, N.V.** The study of the electromagnetic activator energy efficiency in the preparation of liquid organic waste for disposal / **N.V. Limarenko**, E.V. Krasnova, L.A. Pudean // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 659(012109). DOI:10.1088/1755-1315/659/1/012109.

– в изданиях перечня ВАК:

6. **Лимаренко, Н.В.** Исследование параметров магнитного поля в рабочей камере индуктора / **Н.В. Лимаренко**, В.П. Жаров, Ю.В. Панов, Б.Г. Шаповал // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 1. – С. 136-142.

7. **Лимаренко, Н.В.** Влияние температуры на параметры работы индуктора, используемого при обеззараживании материалов / **Н.В. Лимаренко**, В.П. Жаров // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2016. – № 1. – С. 88-91.

8. **Лимаренко, Н.В.** Экспериментальное исследование влияния массы рабочих тел на параметры, характеризующие качество функционирования

индуктора / **Н.В. Лимаренко**, В.П. Жаров, Ю.В. Панов, Б.Г. Шаповал // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 2. – С. 90-96.

9. **Лимаренко, Н.В.** Определение закона распределения плотности вероятностей числа колониеобразующих единиц в технологическом процессе обеззараживания стоков животноводческих ферм / **Н.В. Лимаренко**, В.П. Жаров // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 2. – С. 136-140.

10. **Лимаренко, Н.В.** Определение закона распределения плотности вероятностей удельной электрической энергоёмкости при обеззараживании стоков агропромышленного комплекса / **Н.В. Лимаренко**, В.П. Жаров // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2017. – № 2. – С. 118-121.

11. **Лимаренко, Н.В.** Создание математической модели технологического процесса обеззараживания стоков животноводства / **Н.В. Лимаренко** // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2017. – № 3. – С. 108-112.

12. Месхи, Б.Ч. Создание математической модели для оценки энергоёмкости процесса обеззараживания стоков животноводства / Б.Ч. Месхи, **Н.В. Лимаренко**, В.П. Жаров, Б.Г. Шаповал // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 4. – С. 129-135.

13. **Лимаренко, Н.В.** Обоснование конструкции активаторов обеззараживания жидкой фракции отходов животноводства / **Н.В. Лимаренко**, Л.А. Пудеян // Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс]: сетевой электрон. науч. журн. / Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. – Ростов н/Д., 2019. – № 1(1). – 10 с. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5606>.

14. Цымбал, А.А. Процесс перемещения рабочих тел в постробочей зоне активатора обеззараживания / А.А. Цымбал, Г.Д. Кокорев, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – Рязань. – 2019. – №2. – С. 121-129.

15. Бышов, Н.В. Экспериментальная оценка достоверности оптимальных параметров активатора обеззараживания жидких отходов животноводства / Н.В. Бышов, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Техника и оборудование для села. – 2019. – № 8 (266). – С. 28-31.

16. Успенский, И.А. Исследование влияния параметров рабочих тел индуктора на коэффициент мощности / И.А. Успенский, И.А. Юхин, Г.А. Борисов, **Н.В. Лимаренко** // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса. – 2019. – № 3 (55). – С. 360-369. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-03-45.

17. Бышов, Н.В. Исследование распределения плотности вероятностей патогенных маркеров свиного бесподстилочного навоза / Н.В. Бышов, **Н.В. Лимаренко**, И.А. Успенский, С.Д. Фомин, М.Ю. Чаткин, И.А. Юхин // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса. – 2019. – № 4 (56). – С. 215-227. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-26.

18. Бышов, Н.В. Методика оценки уровня экологической нагрузки свиноводческих предприятий / Н.В. Бышов, **Н.В. Лимаренко**, И.А. Успенский, И.А. Юхин, А.А. Цымбал // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса. – 2020. – № 1 (57). – С. 268-278. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-27.

19. Бышов, Н.В. Расчёт и моделирование параметров индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью / Н.В. Бышов, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса. – 2020. – № 4 (60). – С. 350-369. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-34.

20. Цымбал, А.А. Моделирование эпидемиологических свойств бесподстилочного навоза при подготовке физико-химическим обеззараживанием / А.А. Цымбал, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – Рязань. – 2020. – № 3. – С. 89-98.

21. Борычев, С.Н. Экосистема утилизации органических отходов животноводства / С.Н. Борычев, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – Рязань. – 2020. – № 4. – С. 83-91.

22. Лаврентьев, А.А. Моделирование электромагнитных характеристик индуктора электрического вихревого аппарата в среде ComsolMultiphysics / А.А. Лаврентьев, **Н.В. Лимаренко**, К.В. Хохлова // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2021. – № 3 (Т. 64). – С. 12-17. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-3-12-17.

23. Борычев, С.Н. Моделирование влияние влажности бесподстилочного навоза на уровень его санитарно-эпидемиологической нагрузки / С.Н. Борычев, **Н.В. Лимаренко**, Е.А. Ракул, И.А. Успенский, И.А. Юхин // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – Рязань. – 2021. – №. 2. – С. 79-87.

24. Борычев, С.Н. Использование нечёткого моделирования при оценке интенсивности технологий утилизации органических отходов / С.Н. Борычев, Н.В. Лимаренко, Е.А. Ракул, И.А. Успенский, И.А. Юхин, К.В. Хохлова // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса. – 2021. – № 1 (61). – С. 298-315. DOI:10.32786/2071-9485-2021-01-29.

25. Борычев, С.Н. Структурно-информационная модель повышения биотрансформационной интенсивности жидкой фракции свиного бесподстилочного навоза / С.Н. Борычев, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко**, С.Д. Фомин, Н.П. Мишуков // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 4. – С. 28-32. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-4-28-32.

– патенты РФ:

26. Пат. 171681 РФ. Устройство для удержания ферромагнитных частиц в

рабочей зоне индуктора при работе с жидкими средами / Б.Ч. Месхи, В.П. Жаров, Б.Г. Шаповал, **Н.В. Лимаренко** // Бюл. – 16. – № 2016147751. Оpubл. 09.06.2017.

27. Пат. 2668906 РФ. Индуктор с замкнутым перемещением рабочих тел / А.А. Лаврентьев, Л.Н. Ананченко, **Н.В. Лимаренко** // Бюл. – 28. – № 2018106113. Оpubл. 04.10.2018.

28. Пат. 2680073 РФ. Способ обеззараживания жидких сред / В.П. Жаров, Б.Г. Шаповал, **Н.В. Лимаренко** // Бюл. – 5. № 2018113501. Оpubл. 14.02.2019.

29. Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2019616853 РФ Определение оптимальных параметров операции обеззараживания отходов агропромышленного комплекса «Optimum agriculture system v. 1.0» / **Н.В. Лимаренко**, Н.В. Дьяченко, Р.Т. Акушуев, А.С. Отакулов // Бюл. – 6. – № 2019616853. Оpubл. 30.05.2019.

30. Пат. 2726309 РФ. Способ утилизации бесподстилочного навоза в биоорганическое удобрение / Н.С. Серпокpылов, **Н.В. Лимаренко**, И.А. Успенский, И.А. Юхин, М.Н. Чаткин / Бюл. – 20. № 2020108045. Оpubл. 13.07.2020.

31. Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021661091 РФ. Система выбора оптимального энерго-экологического направления утилизации отходов животноводства / **Н.В. Лимаренко**, И.А. Успенский, Н.С. Мотуз, И.А. Юхин // № 2021661091. Оpubл. 06.07.2021.

32. Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021663928 РФ. Цифровизированная смарт система эффективной энерго-экологической утилизации органических отходов животноводства / **Н.В. Лимаренко**, И.А. Успенский, Н.С. Мотуз, И.А. Юхин // № 2021663928. Оpubл. 26.08.2021.

33. Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021664838 РФ. Оценка энергетической эффективности сельскохозяйственной техники и технологических операций / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко**, Р.В. Безносюк, Д.А. Воробьев, Н.С. Мотуз // – № 2021664838. Оpubл. 14.09.2021.

34. Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021664791 РФ. Система автоматизированной оценки уровня экологической нагрузки животноводческих предприятий / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко**, Р.В. Безносюк, Д.А. Воробьев, Н.С. Мотуз // – № 2021664791. Оpubл. 14.09.2021.

35. Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021664736 РФ. Оценка эффективности функционирования индукторов электромеханических преобразователей переменного тока в зависимости от эксплуатационных условий / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко**, Р.В. Безносюк, Д.А. Воробьев, Н.С. Мотуз // – № 2021664736. Оpubл. 13.09.2021.

36. Свид. о гос. рег. пр. ЭВМ 2021664999 РФ. Седиментационный анализ полидисперсных систем / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко**, Р.В. Безносюк, Д.А. Воробьев, Н.С. Мотуз, Н.М.

Кодацкий // – № 2021664999. Опубл. 16.09.2021.

– в периодических изданиях:

37. **Лимаренко, Н.В.** Анализ способов обеззараживания / **Н.В. Лимаренко** // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. трудов 8-й междунар. науч. конф. – Ростов-на-Дону, 3-6 марта, 2015. – С. 605-608.

38. **Лимаренко, Н.В.** Специфика выбора биоиндикатора для оценки эффекта обеззараживания стоков сельского хозяйства / **Н.В. Лимаренко, В.П. Жаров** // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. трудов 9-й междунар. науч. конф. – Ростов-на-Дону, 2-4 марта, 2016. – С. 516-518.

39. **Лимаренко, Н.В.** Математическое моделирование магнитных характеристик индуктора для обеззараживания стоков сельского хозяйства / **Н.В. Лимаренко, В.П. Жаров, Б.Г. Шаповал** // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. трудов 9-й междунар. науч. конф. – Ростов-на-Дону, 2-4 марта, 2016. – С. 269-273.

40. **Лимаренко, Н.В.** Анализ процесса обеззараживания стоков сельского хозяйства электромагнитным полем [Электронный ресурс] / **Н.В. Лимаренко, В.П. Жаров, Б.Г. Шаповал** // Молодой исследователь Дона – 2016. – № 1. – Вып. 1. – Режим доступа: <http://mid-journal.ru/> – Загл. с экрана.

41. **Лимаренко, Н.В.** Параметры, характеризующие гигиеническое состояние стоков сельского хозяйства в процессе их обеззараживания / **Н.В. Лимаренко, В.П. Жаров** // Инновационные технологии в науке и образовании. ИТНО-2016: сб. науч. тр. – Ростов на-Дону; Зерноград; п. Дивноморское, 11-17 сентября, 2016. – С. 40-43.

42. **Лимаренко, Н.В.** Анализ влияния физических воздействий на процесс обеззараживания стоков сельского хозяйства / **Н.В. Лимаренко, В.П. Жаров, Б.Г. Шаповал** // Инновационные технологии в науке и образовании. ИТНО-2016: сб. науч. тр. – Ростов на-Дону; Зерноград; п. Дивноморское, 11-17 сентября, 2016. – С. 118-122.

43. **Лимаренко, Н.В.** Исследование влияния заполненности рабочей зоны рабочими телами на качество функционирования индуктора / **Н.В. Лимаренко, П.В. Токарев, А.П. Длинный, Г.М. Скрипка** // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. трудов 10-й междунар. науч. конф. – Ростов-на-Дону, 1-3 марта, 2017. – С. 622-626.

44. **Лимаренко, Н.В.** Создание экологически безопасной технологии утилизации стоков животноводства / **Н.В. Лимаренко, В.П. Жаров, Б.Г. Шаповал** // Инновационные технологии в науке и образовании. ИТНО-2017: сб. науч. тр. – Ростов на-Дону; Зерноград; п. Дивноморское, 11-15 сентября, 2017. – С. 175-179.

45. **Лимаренко, Н.В.** Моделирование технологического процесса утилизации стоков животноводства / **Н.В. Лимаренко** // Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений 2017: сб. трудов междунар. науч. конф. – пос. Дивноморское, 4 – 11 сентября, 2017. – С. 158-166.

46. **Лимаренко, Н.В.** Алгоритмизация теорий и методик расчёта индуктора активатора / **Н.В. Лимаренко** // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: материалы 12-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 22-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2019», 27 февраля-1 марта 2019 г. – Ростов н/Д., 2019. – С. 357-360.

47. Успенский, И.А. Перспективы использования альтернативных химических реагентов при утилизации жидких отходов животноводства / И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Вклад университетской аграрной науки в инновационное развитие агропромышленного комплекса: материалы 70-й междунар. науч. - практ. конф., 23 мая 2019 года. – Рязань, ФГБОУ ВО РГАТУ им. П.А. Костычева. – С. 197-202.

48. Успенский, И.А. Анализ способов разделение бесподстилочного навоза на твёрдую и жидкую фракцию / И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Национальная научно-практическая конференция «Научно-инновационные технологии как фактор устойчивого развития отечественного агропромышленного комплекса» 12 декабря 2019 года г. Рязань. – С. 203-208.

49. Косоруков, Д.И. Исследование траектории движения ферромагнитных частиц и способов интенсификации ими утилизационных циклов отходов в индукторе аппарата вихревого слоя / Д.И. Косоруков, А.А. Цымбал, И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Научно-практические аспекты инновационного развития транспортных систем и инженерных сооружений. Материалы Международной студенческой научно-практической конференции. Министерство сельского хозяйства РФ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева». – 2020. – С. 281-286.

50. **Лимаренко, Н.В.** Экологически рациональный подход к утилизации животноводческих отходов / **Н.В. Лимаренко**, А.А. Лаврентьев // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020» [Электронный ресурс] / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. – Электрон. текстовые дан. (1500 Мб.) – М.: МАКС Пресс, 2020. – Режим доступа: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2020/index.htm, свободный – Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020». ISBN 978-5-317-06417-4.

51. **Лимаренко, Н.В.** Способ повышения энергетической эффективности процессов утилизации материалов в агропромышленном комплексе / Н.С.

Мотуз, **Н.В. Лимаренко** // Актуальные проблемы науки и техники. 2020. Материалы национальной научно-практической конференции. Отв. редактор Н.А. Шевченко. – 2020. – С. 2008-2009.

52. Успенский, И.А. Разработка контрольно-измерительного комплекса оценки энергозатрат электрооборудования транспортно-технологических средств / И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко** // Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры технической эксплуатации транспорта 12 октября 2020 года. Рецензируемое научное издание. – Рязань: Издательство Рязанского государственного агротехнологического университета, 2020. – Том 1 – С. 286-291.

53. Успенский, И.А. Анализ инструментов разработки цифровых двойников как средств оптимизации операций агропромышленного комплекса / И.А. Успенский, И.А. Юхин, **Н.В. Лимаренко**, К.В. Хохлова // Перспективные технологии в современном АПК России: традиции и инновации: материалы 72-й международной научно-практической конференции 20 апреля 2021 года. Рецензируемое научное издание. – Рязань: Издательство Рязанского государственного агротехнологического университета, 2021. – С. 437-440.

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная

Усл. печ. л. 2. Тираж 100 экз. Заказ №1398 подписано в печать 18.01.2022 .

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования*

*«Рязанский государственный агротехнологический университет имени
П. А. Костычева»*

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1

*Отпечатано в издательстве учебной литературы
и учебно-методических пособий ФГБОУ ВО РГАТУ*

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1